

การวัดแรงดันเส้นรีจฟ้าผ่าในระบบสายส่ง 230 เควี ด้วย โวลเตจติไวเดอร์



นายชัยธร ลิมาภรณ์วณิชย์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-0936-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEASUREMENTS OF LIGHTNING SURGE VOLTAGES IN 230 kV TRANSMISSION LINE  
BY VOLTAGE DIVIDER



Mr.Chaiyatorn Limapornvanich

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineer

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-0936-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดแรงดันเส้นรีจไฟฟ้าในระบบสายส่ง 230 เควี ด้วย โวลเตจดีไวเดอร์
โดย	นายชัยธร ลิมาภรณ์วณิชย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีสารศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)

..... กรรมการ  
(นายประเสริฐ รังสีโสภณอารมณ์)

ชัชธร ลิมาภรณ์วณิชย์ : การวัดแรงดันแลร์จฟ้าผ่าในระบบสายส่ง 230 เควี ด้วยโวลเตจดีไว  
 เดอร์ (MEASUREMENTS OF LIGHTNING SURGE VOLTAGES IN 230 KV  
 TRANSMISSION LINE BY VOLTAGE DIVIDER) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สำรวย สังข์สะอาด,  
 อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม, จำนวนหน้า 100 หน้า. ISBN 974-17-0936-6.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการวัดแรงดันแลร์จฟ้าผ่าในระบบสายส่ง  
 230 เควี โดยทำการออกแบบและสร้างระบบวัดแรงดันแลร์จฟ้าผ่า ซึ่งประกอบด้วยโวลเตจดีไวเดอร์  
 แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแลร์จ และอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น  
 แลร์จ และทำการทดสอบคุณสมบัติของระบบวัดตามมาตรฐาน ในส่วนของโวลเตจดีไวเดอร์ได้ทำการ  
 ทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ทดสอบความคงทนระยะสั้นความถี่ต่ำ ทดสอบการเกิดดีสชาร์จ  
 บางส่วน ทดสอบผลตอบสนองของรูปคลื่น ทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น ทดสอบความเป็นเชิงเส้น หาเกล  
 แพกเตอร์ ในส่วนของระบบวัดทั้งหมดได้ทำการทดลองจับแลร์จจำลองในห้องปฏิบัติการและแสดงผล  
 การวัด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบวัดแรงดันแลร์จฟ้าผ่าที่ออกแบบสร้างมีคุณสมบัติเพียงพอ  
 ตามที่ได้ออกแบบไว้ และได้ทำการติดตั้งระบบวัดเข้ากับระบบสายส่ง 230 เควี ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต  
 แห่งประเทศไทย ณ สถานีไฟฟ้าอย บางพลี

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170683321 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : LIGHTNING SURGE / MEASURING SYSTEM / VOLTAGE DIVIDER

CHAIYATORN LIMAPORNVANICH : THESIS TITLE (MEASUREMENTS OF  
LIGHTNING SURGE VOLTAGES IN 230 kV TRANSMISSION LINE BY VOLTAGE  
DIVIDER) THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. SAMRUAY SANGKASAAD,  
Dr.Sc.Techn. THESIS CO-ADVISOR : ASSO. PROF. NARONG YOOTHANOM,  
Ph.D., 100 pp. ISBN 974-17-0936-6.

This thesis deals with the design and construction of lightning surge voltage measuring system in high voltage 230 kV lines. The measuring system composes of damped-capacitor voltage-divider, surge detector and surge recorder. The characteristics of voltage divider were carried out in accordance with international standard including impulse withstand test, ac withstand test, partial discharge test, step response test, short term stability test, linearity test and scale factor was determined. The measuring system was used to measure and record the lightning impulse in laboratory, the recorded waveforms were illustrated. The test result showed that the measuring system works properly. The measuring system was installed in 230 kV transmission line at EGAT's substation, Bang-plee.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ..... Electrical Engineering .....

Field of study ..... Electrical Engineering .....

Academic year ..... 2002 .....

Student's signature .....

Advisor's signature .....

Co-advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด ที่ได้ให้แนวทางศึกษาวิจัย การแก้ปัญหา และแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศมี ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ คุณประเสริฐ รั้งสีโสภณอาภรณ์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการประกอบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ ให้ความเอื้อเฟื้อเพื่อดำเนินการอุปกรณ์และสถานที่ในการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ คุณณรงค์ ทองฉิม ที่ให้คำแนะนำทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความร่วมมือในการทำวิทยานิพนธ์อย่างดีเสมอมา เจ้าหน้าที่สถานีไฟฟ้าย่อยบางพลี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อำนวยความสะดวกและให้ความร่วมมือในการทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูง และการติดตั้งระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดมา รวมทั้งบุคคลอีกหลายๆท่านที่ยังมิได้เอ่ยถึง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้เป็นกำลังใจ และสนับสนุนในทุกๆด้านตลอดมา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์.....	Error! Bookmark not defined.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	๑
กิตติกรรมประกาศ.....	๓
สารบัญ.....	๗
สารบัญตาราง.....	๘
สารบัญรูป.....	๘

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.4 ขอบข่ายการทำวิทยานิพนธ์.....	3
2. การวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า.....	4
2.1 แรงดันเสิร์จฟ้าผ่า.....	4
2.1.1 ฟ้าผ่าโดยตรง.....	4
2.1.2 ฟ้าผ่าเหนี่ยวนำ.....	5
2.1.3 การดีสชาร์จในก้อนเมฆ.....	6
2.2 ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า.....	6
2.3 คุณสมบัติของระบบวัด.....	7
2.3.1 ผลตอบสนองของรูปขึ้น.....	7
2.3.2 สเกลแฟกเตอร์.....	12
2.4 โวลเตจดีไวเดอร์.....	14
2.4.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	14
2.5 การต่อแม่ทึงในภาคแรงต่ำของระบบวัด.....	17
2.6 การตรวจจับสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่า.....	19
2.6.1 หน้าที่ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่า.....	19
2.6.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่า.....	20

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.7 การวัดและบันทึกรูปคลื่นสัญญาณ .....	20
3. การออกแบบและสร้างระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า .....	22
3.1 การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ .....	22
3.1.1 เงื่อนไขในการออกแบบ .....	22
3.1.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง .....	22
3.1.3 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ .....	26
3.2 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน .....	29
3.2.1 การเลือกแรงดันขาออก .....	29
3.2.2 ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ .....	29
3.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ .....	31
3.3.1 วงจรบัฟเฟอร์ .....	31
3.3.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน .....	31
3.3.3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ .....	33
3.3.4 วงจร Monostable .....	34
3.4 อุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น .....	37
3.4.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงาน .....	38
3.4.2 วงจรภาคแอนะล็อก .....	39
3.4.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์แอปพลิเคชันเพื่อใช้ในการวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า .....	42
4. การทดสอบและประเมินผล .....	47
4.1 การทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ .....	47
4.1.1 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ .....	47
4.1.2 การทดสอบความคงทนระยะสั้นความถี่ต่ำ .....	50
4.1.3 การทดสอบการเกิดดีส์ชาร์จบางส่วน .....	51
4.1.4 การหาผลตอบสนองของรูปขึ้น .....	52
4.1.5 การหาสเกลแฟกเตอร์ .....	55
4.1.6 การทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น(Short term stability) .....	56
4.1.7 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น(Linearity test) .....	57
4.2 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ .....	58



## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3 การทดสอบเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ .....	63
4.4 การจำลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า.....	67
4.5 การติดตั้งระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า.....	70
5. สรุปและข้อเสนอแนะ .....	71
5.1 สรุป.....	71
5.1.1 ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า.....	71
5.1.2 การทดสอบ.....	73
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก .....	77
ภาคผนวก ข.....	80
ภาคผนวก ค .....	94
ภาคผนวก ง.....	99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ระดับแรงดันในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์..... 49
4.2	พารามิเตอร์ผลตอบแทนในกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น โดยคิดเวลาหน้าคลื่น $T_1 = 0.8 \mu s$ ..... 52
4.3	ค่าเก็บประจุขององค์ประกอบในระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ..... 55
4.4	อัตราการลดทอนก่อนและหลังการทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น..... 56
4.5	การทดสอบความเป็นเชิงเส้นโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว..... 57
4.6	การทดสอบความเป็นเชิงเส้นโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล..... 58
4.7	เปรียบเทียบอัตราการลดทอนของวงจรรองความถี่สูงผ่าน ..... 59
4.8	การทดสอบความแม่นยำเชิงแอมพลิจูดของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์..... 64
4.9	รูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ ที่วัดโดยออสซิลโลสโคป..... 66
4.10	รูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ ที่วัดโดยเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์..... 67

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ฟ้าผ่าลงบนสายส่งทำให้เกิดแรงดันเสิร์จเป็นคลื่นจร..... ก
2.2	แรงดันเสิร์จบนสายส่งเนื่องจากฟ้าผ่าใกล้เคียง..... 5
2.3	แรงดันเสิร์จเนื่องจากดิสชาร์จในก้อนเมฆ..... 6
2.4	ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า..... 6
2.5	ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด..... 7
2.6	วงจรวัดผลตอบสนองของรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดันโดยที่ G คือแกปสร้างแรงดันรูปขึ้น..... 9
2.7	นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง..... 10
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta$ กับ $T_\alpha/T_x$ ..... 11
2.9	ภาพสเกตช์ของค่าเก็บประจุสมมูล $C_{eq}$ ของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ..... 12
2.10	ภาพสเกตช์ของท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ..... 13
2.11	วงจรมุมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ..... 15
2.12	ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณ..... 15
2.13	ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ..... 16
2.14	วงจรมุมมูลของการต่อแมทซิงสำหรับโวลเตจดีไวเดอร์แบบต่างๆ..... 17
2.15	ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ..... 18
2.16	สัญญาณเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิด ณ ช่วงเวลาต่างของสัญญาณความถี่ระบบ..... 19
2.17	หลักการการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ..... 20
2.18	สเปคตรัมอัมพลิจูดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 $\mu\text{sec}$ รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัด . 20
3.1	การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุและความต้านทานย่อยแต่ละชั้น..... 23
3.2	ชุดตัวเก็บประจุและความต้านทานย่อยภาคแรงสูงแต่ละท่อน..... 25
3.3	ชุดตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ทำการประกอบภายในฉนวนพอร์ซเลน..... 26
3.4	ชุดตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ..... 28
3.5	วงจรมุมมูลตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ..... 29
3.6	ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ..... 30
3.7	วงจรรองความถี่สูงผ่านลำดับที่ 1 ต่อ cascade 2 วงจร..... 31
3.8	กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายกับความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่าน..... 33
3.9	การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณและวงจร Monostable..... 34

## สารบัญญรูป(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.10	ผังวงจรของอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ..... 35
3.11	เครื่องตรวจจับสัญญาณเสิร์จ..... 36
3.12	เครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์..... 38
3.13	ส่วนประกอบของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์..... 38
3.14	ไดอะแกรมการทำงานของดิจิติไลเซอร์..... 39
3.15	วงจรมอดแวนะลอกของดิจิติไลเซอร์..... 41
3.16	ลำดับการทำงานของกรอ่านข้อมูลเสิร์จ..... 43
3.17	หน้าตาส่วนบันทึกรูปคลื่นเสิร์จ..... 44
3.18	หน้าตาส่วนแสดงข้อมูลเสิร์จ..... 45
3.19	หน้าตาส่วนรายละเอียดการจับข้อมูลเสิร์จ..... 45
3.20	องค์ประกอบทั้งหมดของระบบวัดแรงดันเสิร์จ..... 46
4.1	วงจรทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์..... 47
4.2	การทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์..... 48
4.3	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์..... 49
4.4	การทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำ..... 50
4.5	วงจรตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน..... 51
4.6	วงจรมหาผลตอบสนองรูปขึ้น..... 52
4.7	ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์ก่อนปรับค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ..... 53
4.8	ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์..... 53
4.9	ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์ เมื่อต่อสายเคเบิลนำสัญญาณ 150 เมตร..... 53
4.10	วงจรมหาผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอน..... 54
4.11	ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอน..... 54
4.12	วงจรมุมมูลในการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัด..... 55
4.13	สัญญาณที่ได้จากวงจรองความถี่สูงผ่าน..... 60
4.14	สัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ..... 61
4.15	สัญญาณที่ได้จากวงจร Monostable..... 62
4.16	สัญญาณเสิร์จที่ต่ำที่สุดที่ทำให้อุปกรณ์เริ่มทำงาน..... 63
4.17	การทดสอบความแม่นยำเชิงแอมพลิจูดของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์..... 63

## สารบัญรูป(ต่อ)

บทที่	หน้า
4.18 การทดสอบความแม่นยำเชิงเวลาของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์.....	65
4.19 รูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 $\mu$ s ที่วัดโดยออสซิลโลสโคป.....	66
4.20 รูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 $\mu$ s ที่วัดโดยเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์.....	67
4.21 วงจรสมมูลการจำลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า.....	68
4.22 วงจรทดลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า.....	69
4.23 รูปคลื่นเสิร์จที่บันทึกได้จากการจำลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า.....	69
4.24 ไดอะแกรมตำแหน่งการติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์.....	70
4.25 โวลเตจดีไวเดอร์ที่ติดตั้งในระบบสายส่ง 230 kV.....	70
ก.1 แรงแดันอิมพัลส์ลบตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม 0°.....	77
ก.2 แรงแดันอิมพัลส์ลบตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม 90°.....	77
ก.3 แรงแดันอิมพัลส์ลบตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม 180°.....	77
ก.4 แรงแดันอิมพัลส์ลบตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม 270°.....	78
ก.5 แรงแดันอิมพัลส์บวกตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม 0°.....	78
ก.6 แรงแดันอิมพัลส์บวกตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม 90°.....	78
ก.7 แรงแดันอิมพัลส์บวกตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม 180°.....	79
ก.8 แรงแดันอิมพัลส์บวกตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม 270°.....	79
ข.1 วงจรภาคดิจิทัล.....	81
ข.2 รายละเอียดวงจรประกอบภายนอกของภาคดิจิทัล.....	82
ข.3 บล็อกไดอะแกรมวงจร Clock generator.....	83
ข.4 วงจร DLL block.....	84
ข.5 วงจร Clock Divider โดยใช้ Linear Feedback Shift Register.....	84
ข.6 ลักษณะสัญญาณ CE ( Clock Enable ).....	85
ข.7 วงจร ADC Buffer และปรับอัตราซั๊กตัวอย่าง.....	85
ข.8 Dual-port Block SelectRAM+ Memory.....	86
ข.9 วงจร Programmable Delay Line โดยใช้ Block SelectRAM+.....	86
ข.10 Timing Diagram ช่วงการเขียนข้อมูลลง Memory.....	87
ข.11 วงจร Memory to Data Bus Buffer.....	88
ข.12 Timing Diagram การอ่านข้อมูลจาก Memory.....	89

## สารบัญรูป(ต่อ)

บทที่	หน้า
ข.13	แสดงรูปแบบการเขียนและอ่านข้อมูลจาก Memory ..... 89
ข.14	แสดงวงจร Control Register และ Address ..... 90
ข.15	Memory Map ของ Control Register วงจรส่วน digital ..... 93
ง.1	ภาพสเกทช์แสดงภาคตัดขวางของฉนวนพอร์ซเลนที่นำมาประกอบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ 99



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำทั่วไป

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีโอกาสได้รับแรงดันเกินที่มีต้นกำเนิด 2 ประเภท ประเภทแรกมีต้นกำเนิดมาจากภายในบรรยากาศ เช่น ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ประเภทที่สองมีต้นกำเนิดเกิดจากภายในระบบ เช่น แรงดันเกินสวิตชิงอันเนื่องมาจากการปิดวงจร เปิดวงจร ซึ่งอาจมีขนาดเกินกว่าแรงดันระบบหลายเท่า การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์และระบบจะได้รับการออกแบบให้ทนต่อแรงดันเกินได้ระดับหนึ่ง ส่วนที่เกินกว่านั้นจะให้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินทำหน้าที่ตัด ยุบ หรือลดทอนลงให้ต่ำพอ เพื่อมิให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์และระบบ โดยอาศัยการประสานการฉนวน (Insulation coordination) ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

การส่งจ่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นระบบสายชิงอากาศ และติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยแบบกลางแจ้ง ดังนั้นอุปกรณ์ทั้งหลายเหล่านี้มีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ซึ่งทำให้การฉนวนได้รับผลกระทบจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเกิน และอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้

แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning overvoltage) ที่เกิดในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าอาจแบ่งลักษณะการเกิดได้เป็น 3 แบบ คือ ฟ้าผ่าโดยตรง แรงดันเกินฟ้าผ่าเหนี่ยวนำ และแรงดันเกินเนื่องจากดีสชาร์จในก้อนเมฆ [1] แรงดันเกินเหล่านี้จะมีช่วงการเกิดระยะสั้นๆ ในลักษณะเสิร์จหรือทรานเซียนต์ และมีขนาดมากกว่าแรงดันเกินชนิดอื่นๆ แรงดันเสิร์จฟ้าผ่าแม้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาอันสั้นแต่มีความสำคัญยิ่งต่อเสถียรภาพ (Stability) และความเชื่อถือได้ (Reliability) ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพราะในช่วงเวลาดังกล่าว การฉนวน (Insulation) ของระบบและของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) หากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric strength) จะทำให้ฉนวนเกิดเบรกดาวน์ และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดปกติ (Fault) ขึ้นในระบบ ดังนั้นมาตรฐานจึงกำหนดให้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต้องผ่านการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Basic impulse insulation level) [2] ก่อนนำไปติดตั้งใช้งานในระบบ

แรงดันเสิร์จฟ้าผ่าเป็นแรงดันเกินที่ไม่เป็นคาบ เกิดขึ้นและหายไปอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นการวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าจึงต้องใช้ระบบวัดที่มีความไวและคุณลักษณะเฉพาะ

## 1.2 ที่มาของปัญหา

ในการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัย ผู้ใช้มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีความต่อเนื่อง เพื่อให้การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ระบบไฟฟ้าที่ดีควรเป็นระบบไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ในระดับหนึ่ง การป้องกันแรงดันเสิร์จจึงเป็นปัญหาสำคัญที่ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้านำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบระบบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดปกติของภายในระบบไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบการฉนวนที่มีการประสานสัมพันธ์ระหว่างระดับการฉนวนกับระดับป้องกันจึงควรทราบถึงคุณสมบัติของแรงดันเกินเสิร์จที่เกิดขึ้นในระบบ และหากการประสานสัมพันธ์การฉนวนได้รับการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพนอกจากจะป้องกันความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นแล้วยังสามารถช่วยยืดอายุการทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า

แต่ข้อมูลเกี่ยวกับแรงดันเกินเสิร์จที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นวิทยาศาสตร์หรือเป็นระบบ จึงสมควรอย่างยิ่งที่จะได้มีการศึกษาข้อมูลของแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าเหล่านี้ เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบการประสานสัมพันธ์การฉนวนและใช้ในการศึกษาต่อไป

## 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบสายส่งแรงสูงได้มีมานานแล้วในต่างประเทศ ทั้งการศึกษาทางด้านทฤษฎีและการทดสอบวัดจริง ดังจะเห็นได้ว่ามีรายงานผลการวิจัยหลายฉบับเช่น การวัดและวิเคราะห์แรงดันเสิร์จในสถานีไฟฟ้าย่อยระบบ 550 kV. ในประเทศญี่ปุ่น[3] เป็นต้น โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเป็นลักษณะของแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นเฉพาะพื้นที่นั้นๆ

ในประเทศไทยการศึกษาเรื่องแรงดันเสิร์จในระบบสายส่งนั้นมีการศึกษามุ่งเน้นในเรื่องแรงดันเสิร์จสวิตชิงซึ่งมากกว่าแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า เพราะเนื่องจากโอกาสในการเกิดแรงดันเสิร์จสวิตชิงจะมีมากกว่าการเกิดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า และอุปกรณ์ภายในระบบจะทำการออกแบบให้สามารถทนต่อการทดสอบระดับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า(BIL)ซึ่งเป็นที่เชื่อถือได้ว่าอุปกรณ์นั้นสามารถทนต่อแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าได้ในระดับหนึ่ง ตัวอย่างการศึกษาภายในประเทศนั้นได้แก่ การศึกษาวิจัยเรื่อง Transient switching surge ในระบบ 69 kV ของสถานีต้นทางลาดพร้าว ขณะปลดสวิตซ์ตัดตอนสายส่งที่ไม่มีโหลด[4] เป็นต้น ส่วนในกรณีการศึกษาแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบสายส่งในประเทศไทยยังมีอยู่น้อยมาก และไม่มีการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น

เนื่องจากแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งมีระดับแรงดันที่สูงมาก การวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ลดทอนแรงดันเพื่อให้ระดับแรงดันอยู่ในย่านที่



อุปกรณ์วัดสามารถรับได้ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยโวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับลดทอนแรงดัน การออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ได้เคยมีการศึกษาและสร้างโดยสถาบันการศึกษาภายในประเทศ เช่น การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์[5] โดยเป็นการออกแบบเพื่อใช้ภายในห้องทดสอบ แต่ในการวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โวลเตจดีไวเดอร์จำเป็นต้องติดตั้งแบบภายนอกอาคารและจะได้รับแรงดันที่ความถี่ระบบตลอดการติดตั้ง ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานที่สุด

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการศึกษาด้านแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบสายส่งในประเทศไทยจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการเสนอแนะการออกแบบการประสานสัมพันธ์การฉนวนในระบบส่งจ่ายต่อไป

#### 1.4 ขอบข่ายการทำวิทยานิพนธ์

การทำวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าโดยใช้โวลเตจดีไวเดอร์เพื่อนำไปใช้วัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 230 kV โดยมีขอบข่ายของงานดังนี้

- 1) ออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุสำหรับวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบแรงดัน 230 kV 50 Hz
- 2) ประกอบสร้างอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น เพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า
- 3) ออกแบบสร้างอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ เพื่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น
- 4) ทดสอบคุณลักษณะของโวลเตจดีไวเดอร์ อุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น และอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จฟ้าผ่า ก่อนนำไปติดตั้ง
- 5) ทำการจำลองการตรวจจับแรงดันเสิร์จที่ตกคร่อมแรงดันความถี่ระบบในห้องปฏิบัติการ เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบวัด
- 6) ทำการติดตั้งระบบวัดในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 230 kV
- 7) สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ

ในการติดตั้งระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าจะทำการติดตั้ง ณ สถานีไฟฟ้าย่อยบางพลี โดยได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านสถานที่และความร่วมมือจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และเพื่อความปลอดภัยต่อระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ โวลเตจดีไวเดอร์จะต้องได้รับการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 71[2]ก่อนนำไปติดตั้งกับระบบผ่านสวิตซ์ตัดตอนวงจร

## บทที่ 2

### การวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า

#### 2.1 แรงดันเสิร์จฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ อันเป็นผลของการคายประจุหรือดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ดีสชาร์จที่เกิดขึ้นสามารถเกิดระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆหรือระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกก็ได้ โดยประจุที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าขึ้น เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินค่าวิกฤตของความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศจะทำให้เกิดการดีสชาร์จขึ้น

ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นอาจทำให้เกิดความเสียหายหรืออันตรายทั้งในรูปของ ผลทางความร้อน ผลทางกล และผลทางไฟฟ้า แรงดันเสิร์จฟ้าผ่าถือเป็นผลทางไฟฟ้าที่เกิดจากฟ้าผ่าเช่นกัน โดยแยกออกตามลักษณะการเกิดได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1) ฟ้าผ่าโดยตรง
- 2) ฟ้าผ่าเหนี่ยวนำ
- 3) การดีสชาร์จในก้อนเมฆ

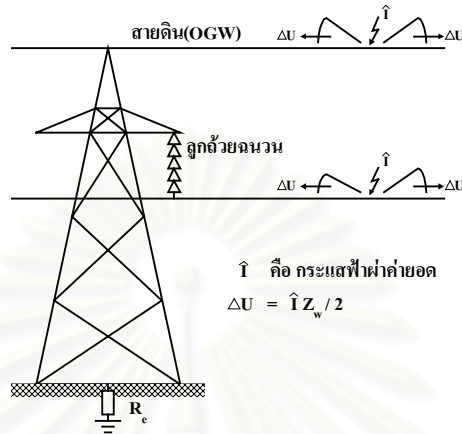
##### 2.1.1 ฟ้าผ่าโดยตรง

ฟ้าผ่าอาจผ่าลงบนอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือสายส่งที่มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์  $Z_w = \sqrt{L/C}$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  และค่าความจุไฟฟ้า  $C$  ของสายส่ง กระแสฟ้าผ่าที่ผ่าลงบนสายโดยตรงจะทำให้เกิดแรงดันเกินเสิร์จเป็นคลื่นจรวิ่งออกไปตามสายส่งทั้งสองด้านของจุดที่เกิดการผ่า ดังรูปที่ 2.1 โดยแรงดันเกินเสิร์จจะมีขนาดเท่ากับ  $\Delta U = I_{peak} \times Z_w / 2$  เมื่อคลื่นจรวิ่งไปถึงพวงลูกถ้วยฉนวนที่ยึดสายไฟก็อาจจะเกิดวาบไฟตามผิวพวงลูกถ้วยฉนวนได้ หรือวิ่งไปตามสายส่งจนถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หากไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินก็อาจทำให้ฉนวนของอุปกรณ์ภายในระบบเกิดการเบรกดาวน์หรือผิดพลาดขึ้นได้

หากเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลังไฟฟ้า จะทำให้เกิดแรงดันเกินบนสายดินและอาจเป็นเหตุให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ(backflashover)บนพวงลูกถ้วยฉนวนได้ หรือแม้แต่ผ่าลงบนเสาไฟฟ้าก็อาจเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับได้เช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากกระแสฟ้าผ่าทำให้โครงสร้างไฟฟ้ามีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น เพราะความต้านทานรากสายดินที่ฐานเสาไฟฟ้า  $R_0$  และความเหนี่ยวนำ  $L$  ของเสาไฟฟ้ามีค่าสูงมากพอ แรงดันที่เกิดขึ้นจาก  $R_0$  และ  $L$  อาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\Delta U = I_{\text{peak}} R_e + L(di/dt)$$

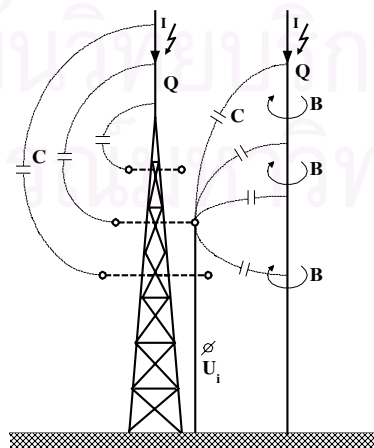
เมื่อ  $I_{\text{peak}}$  คือ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า เป็น kA  
 $di/dt$  คือ ความชันช่วงหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่า เป็น kA/ $\mu$ s



รูปที่ 2.1 ฟ้าผ่าลงบนสายส่งทำให้เกิดแรงดันเสิร์จเป็นคลื่นจร

### 2.1.2 ฟ้าผ่าเหนี่ยวนำ

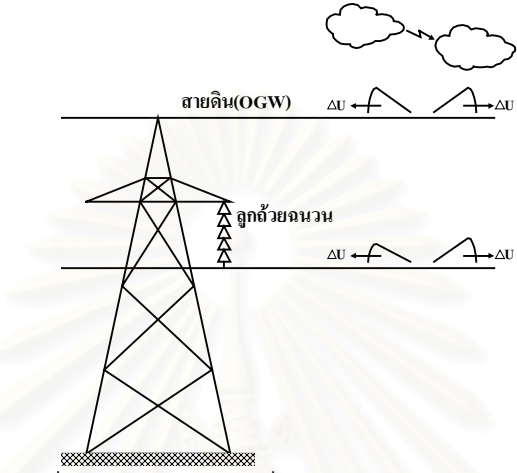
แรงดันเสิร์จฟ้าผ่าแบบนี้เกิดจากฟ้าผ่าข้างเคียง คืออาจเกิดฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียงสายส่งไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนสายส่ง ซึ่งอาจมีค่าสูงถึง 300-400 กิโลโวลต์[6] และมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 70 กิโลโวลต์ แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟ้าผ่าใกล้เคียงนี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ เกิดจากการคับปลิงของประจุในหัวนำร่อง(leader)ของฟ้าผ่ากับสายส่งจ่าย และเกิดจากการคับปลิงระหว่างลำฟ้าผ่ากับสายส่งในลักษณะเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดรอบลำกระแสฟ้าผ่า ดังรูปที่ 2.2[6]



รูปที่ 2.2 แรงดันเสิร์จบนสายส่งเนื่องจากฟ้าผ่าใกล้เคียง

### 2.1.3 การดีสชาร์จในก้อนเมฆ

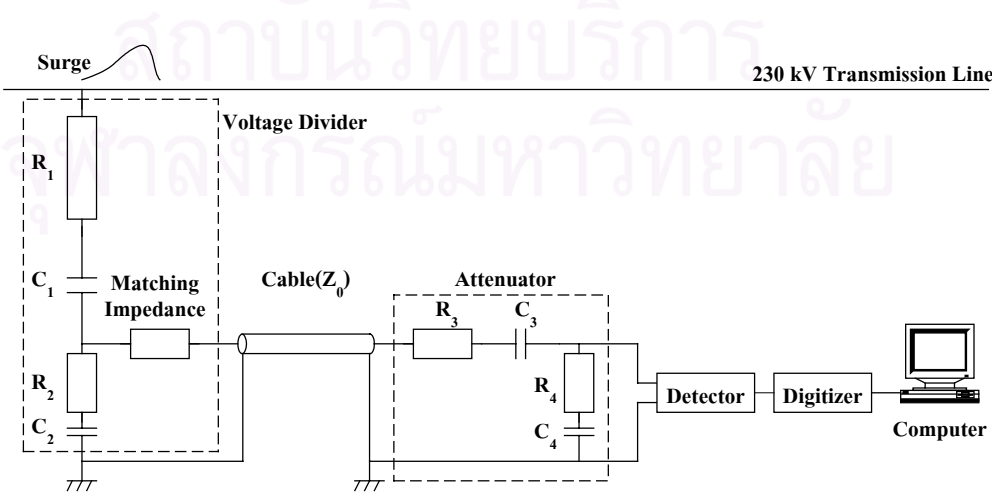
ในกรณีที่ก้อนเมฆมีประจุลดย่อยอยู่เหนือบสายส่ง เมื่อประจุในก้อนเมฆเกิดการดีสชาร์จหายไปหรือเมื่อเกิดการดีสชาร์จระหว่างก้อนเมฆ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุบนสายส่ง ประจุเหนี่ยวนำบนสายส่งจะเคลื่อนที่เป็นคลื่นจรไปตามสายส่ง ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งอาจทำให้เกิดวับไฟตามผิวพวกลูกถ้วยฉนวน หรือวิ่งไปตามสายส่งจนถึงอุปกรณ์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 แรงดันเสิร์จเนื่องจากดีสชาร์จในก้อนเมฆ

### 2.2 ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า

เนื่องจากแรงดันเสิร์จที่จะทำการวัดมีค่าสูงหลายร้อยกิโลโวลต์ ดังนั้นในการวัดจำเป็นต้องลดทอนระดับแรงดันลงมาเพื่อที่อุปกรณ์บันทึกรูปคลื่นจะสามารถตรวจวัดและบันทึกรูปคลื่นได้ อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการลดทอนได้แก่ โวลเตจดิไวเดอร์ เนื่องจากอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่นทำการติดตั้งห่างจากโวลเตจดิไวเดอร์ ดังนั้นเพื่อป้องกันการถูกรบกวนของสัญญาณเสิร์จที่ได้รับการลดทอน จึงกำหนดแรงดันขาออกของโวลเตจดิไวเดอร์ให้มีค่าอยู่ในระดับร้อยโวลต์ และอาศัยตัวลดทอน (attenuator) ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันลงอีกระดับหนึ่ง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า

อุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในระบบวัดมีดังต่อไปนี้

- 1) โวลเตจดีไวเดอร์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันเสิร์จที่มีขนาดหลายร้อยกิโลโวลต์ ซึ่งโดยทั่วไปใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เพราะจะต้องต่ออยู่กับแรงดันระบบซึ่งมีความถี่ต่ำ
- 2) เคเบิลวัด ทำหน้าที่นำสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่าที่ได้รับจากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังตัวลดทอน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะใช้สายเคเบิลแบบแกนร่วม(coaxial cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ
- 3) ตัวลดทอน(attenuator) ทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณจากโวลเตจดีไวเดอร์ให้มีขนาดลดลงอยู่ในย่านที่อุปกรณ์บันทึกสามารถรับได้
- 4) อุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ ทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันเสิร์จที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อสั่งงานให้อุปกรณ์บันทึกทำการบันทึกรูปคลื่น
- 5) อุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น(digitizer + computer) ทำหน้าที่ในการตรวจจับ แสดง และบันทึกสัญญาณเสิร์จที่เข้ามาในระบบ

### 2.3 คุณสมบัติของระบบวัด

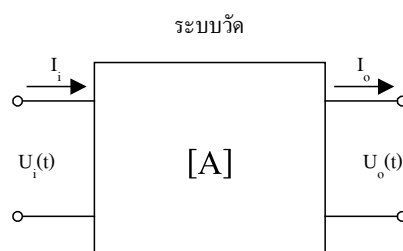
เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันเสิร์จฟ้าผ่ามีความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าควรพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ

- 1) ผลตอบสนองรูปขึ้น
- 2) สเกลแฟกเตอร์

#### 2.3.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน(transfer characteristic) ของโวลเตจดีไวเดอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดียิ่งขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงค่าจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน

โวลเตจดีไวเดอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่ เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $s$  คือ ตัวแปรลาปลาซ

ในกรณีที่  $I_o = 0$  จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน(transfer function) ได้เป็น

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \quad (2.2)$$

ค่า  $H(s)$  จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ ที่ความถี่ต่ำๆแอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป  $\pm 3$  dB เรียกว่าความถี่จำกัด (limit frequency)[7] ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์(normalized transfer function) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \quad (2.3)$$

เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์มักจะมีค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการหาผลตอบสนองแอมพลิจูด/ความถี่(amplitude/frequency response) จึงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีที่นิยมในทางปฏิบัติคือการหาผลตอบสนองรูปขั้น(step response)  $G(t)$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G(t) = L^{-1} \left[ \frac{1}{s} H(s) \right] \quad (2.4)$$

จากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออก เมื่อทราบแรงดันขาเข้า  $V_i(t)$  ได้จาก[8]

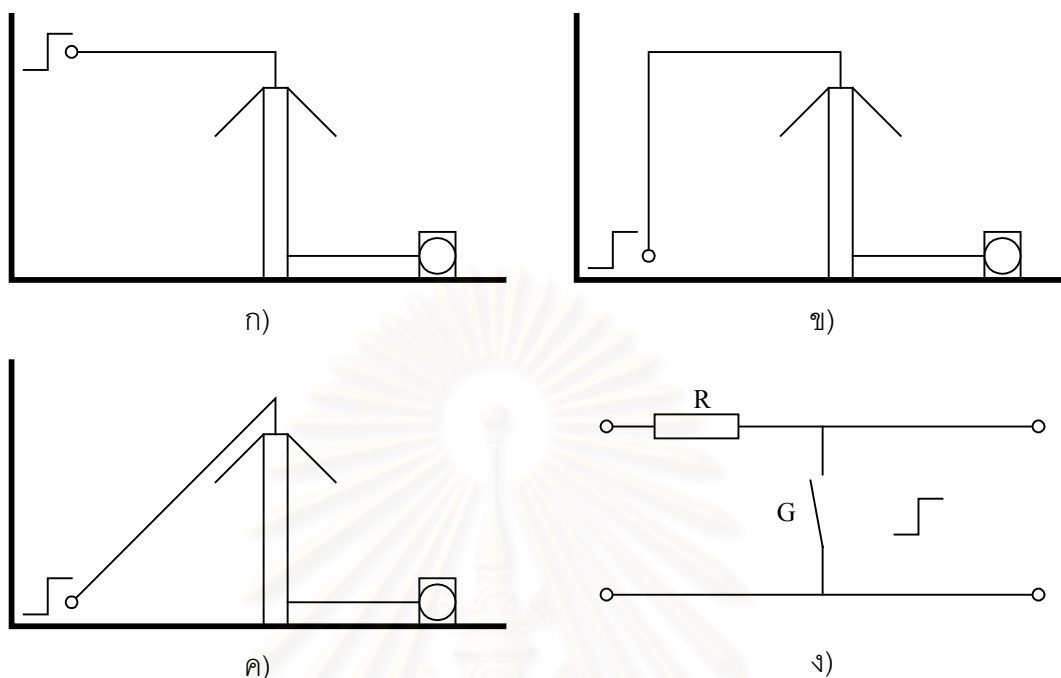
$$V_o(t) = \int_0^t V_i(t-\tau) \cdot G(\tau) \cdot d\tau \quad (2.5)$$

เมื่อ  $V_i(t-\tau)$  คือ อินพุตของ  $V_i(t-\tau)$  เมื่อเทียบกับ  $\tau$

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังแสดงในสมการ

$$T_N = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{1-h(s)}{s} \right] \quad (2.6)$$

วงจรวัดผลตอบสนองของรูปขั้นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60-2 [7] แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรวัดผลตอบสนองของรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดัน  
โดยที่ G คือแกปสร้างแรงดันรูปขั้น

วงจรมาตรฐานแนะนำไว้คือ วงจรในรูปที่ 2.6ก) และพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองของรูปขั้น มาตรฐานได้กำหนดนิยามไว้ดังนี้

1) พารามิเตอร์ผลตอบสนอง(response parameters) หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองของรูปขั้นโดยวิธีที่กำหนด

2) จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองของรูปขั้น(virtual origin of a step response,  $O_1$ ) หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองของรูปขั้น ในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่น จะใช้เส้นเฉียดลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่งและใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น

3) ผลตอบสนองของรูปขั้นนอร์มัลไลซ์(normalized step response,  $g(t)$ ) หมายถึง ผลตอบสนองของรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 2.7ก)

4) อินทิกรัลผลตอบสนองของรูปขั้น(step response integral) หมายถึง อินทิกรัลจาก  $O_1$  ถึง  $t$  ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองของรูปขั้น  $g(t)$  (ดูรูปที่ 2.7ข)

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau$$

5) เวลาตอบสนองจากการทดลอง(experiment response time,  $T_N$ ) หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่  $t_{\max}$

$$T_N = T(t_{\max})$$

6) เวลาตอบสนองบางส่วน(partial response time,  $T_a$ ) หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

7) เวลาตอบสนองเศษเหลือ(residual reponse time,  $T_R(t_i)$ ) หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด  $t_i$  โดยที่  $t_i < t_{\max}$

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i)$$

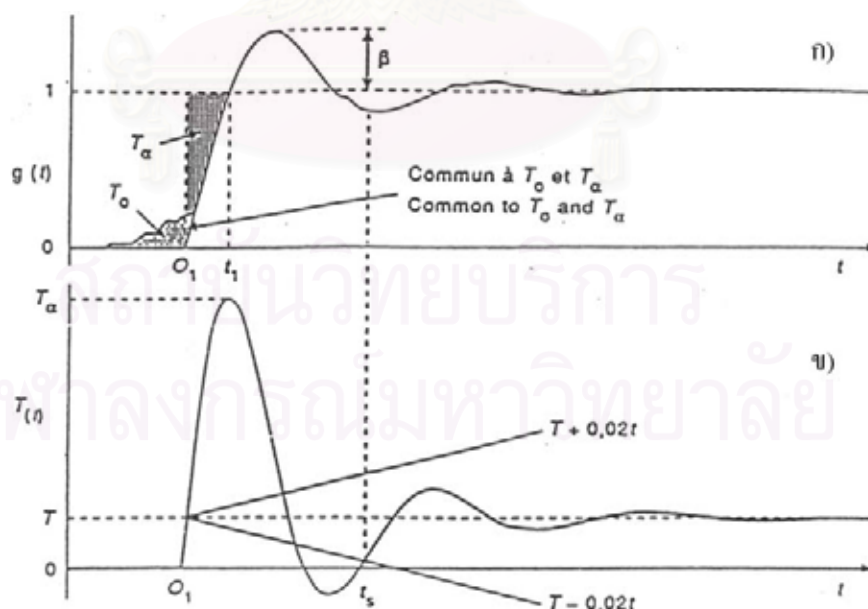
8) ส่วนพุ่งเกิน(overshoot,  $\beta$ ) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์  $g(t)$  ที่เกินหนึ่งหน่วย

9) เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น(initial distortion time,  $T_o$ ) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์, ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์  $g(t)$  และเส้นตรงที่ใช้หา  $O_1$

10) เวลาเข้าสู่ภาวะคงตัว(settling time,  $t_s$ ) หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองเศษเหลือ  $T_R(t_i)$  มีค่าน้อยกว่า 2% ของ  $t$

$$\left| T_N - T(t_{\max}) \right| < 0.02t_s$$

สำหรับทุกๆค่าของ  $t$  ในช่วงจาก  $t_s$  ถึง  $t_{\max}$



รูปที่ 2.7 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง [7]

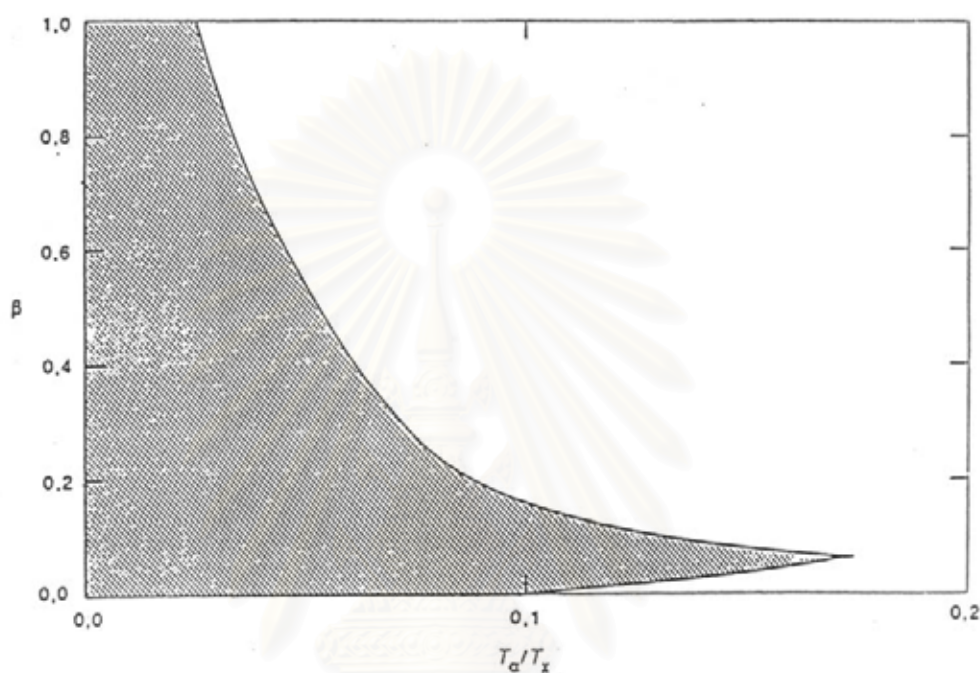
ก) เมื่อเทียบกับ  $g(t)$

ข) เมื่อเทียบกับ  $T(t)$



เนื่องจากในมาตรฐาน[7]ไม่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ดังนี้

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ที่ค่าเวลาหน้าคลื่น  $T_1$  ส่วนพุ่งเกิน  $\beta$  และเวลาตอบสนองบางส่วน  $T_\alpha$  ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า  $\beta$  และ  $T_\alpha/T_1$  จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรเงาของรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $T_\alpha/T_x$  [7]

โดยที่  $T_x$  คือ เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาคลื่นตัด  $T_c$  พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- เวลาตอบสนองและเวลาตอบสนองบางส่วนควรมีค่า

$$T_\alpha - 0.03T_c \leq T_N \leq 0.03T_c$$

- เวลาเข้าสู่ภาวะคงตัวควรมีค่า

$$t_s \leq T_c$$

- เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้นควรมีค่า

$$T_0 \leq 0.005T_c$$

ในกรณีของระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าจะทำการอ้างอิงกับกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม เพราะเป็นรูปแบบแรงดันอิมพัลส์ที่มาตรฐานกำหนดเพื่อใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีที่รับแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า

## 2.3.2 สเกลแฟกเตอร์

### 2.3.2.1 ความหมายของสเกลแฟกเตอร์

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัด มาตรฐาน IEC 60-2 [7] ได้นิยามไว้ดังนี้ “สเกลแฟกเตอร์ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า” มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) ความไม่แน่นอน (uncertainty) ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน  $\pm 3\%$

2) ความมีเสถียรภาพ ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $\pm 1\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน

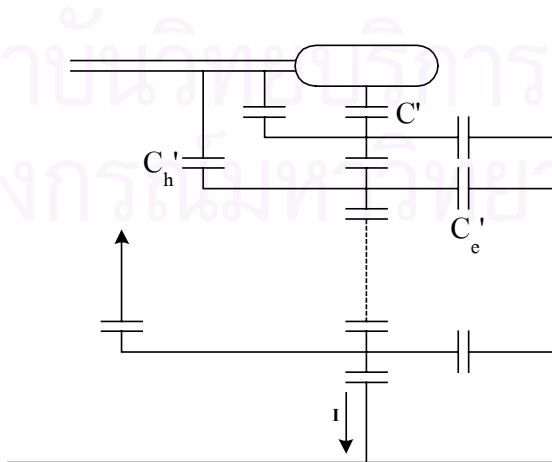
### 2.3.2.2 การหาสเกลแฟกเตอร์

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์ สามารถหาได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้

- 1) การวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน
- 2) ใช้วงจรบริดจ์
- 3) คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์โดยการคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ มาตรฐาน IEC 60-2 ได้ให้ข้อแนะนำไว้ ดังนี้

กรณีของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ค่าเก็บประจุสเตรย์จะมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์คือกระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ รูปที่ 2.9 แสดงภาพสเกตช์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ซึ่งประกอบด้วยค่าเก็บประจุย่อย  $C'$  ต่ออนุกรมกันและมีค่าเก็บประจุสเตรย์  $C_h'$  และ  $C_e'$  ต่ออยู่ในจำนวนที่เท่ากัน



รูปที่ 2.9 ภาพสเกตช์ของค่าเก็บประจุสมมูล  $C_{eq}$  ของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

ในภาวะคงตัว สามารถหาค่าเก็บประจุสมมูล (equivalent capacitance)  $C_{eq}$  ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงได้จากสมการ [8]

$$C_{eq} = \frac{I}{\omega U} \quad (2.7)$$

$$C_{eq} = C \frac{1 + \frac{C_h}{4C}}{1 + \frac{C_e}{6C} + \frac{C_h}{12C}} \quad (2.8)$$

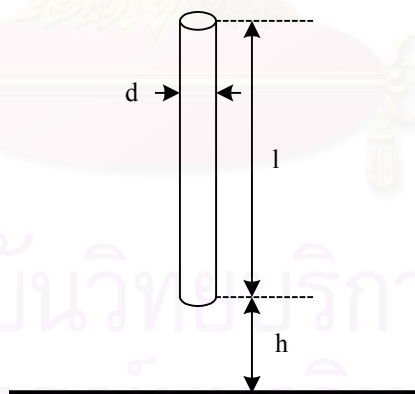
โดยที่  $C = C'/n$ ;  $C_e = nC_e'$ ;  $C_h = nC_h'$ ;  $n \gg 1$

เนื่องจาก  $C_h$  มีค่าน้อยกว่า  $C_e$  มาก ดังนั้น  $C_{eq}$  จึงมีค่าน้อยกว่า  $C$  เสมอ และถ้าให้  $C_h = 0$  จะสามารถประมาณ  $C_{eq}$  ได้เป็น

$$C_{eq} = C \frac{1}{1 + \frac{C_e}{6C}} \quad (2.9)$$

$$C_{eq} = C \left( 1 - \frac{C_e}{6C} \right)$$

โดย  $C_e$  สามารถหาได้จากการคำนวณ โดยสมมติให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเป็นท่อโลหะทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ ดังภาพแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งสมการที่ใช้หาค่าเก็บประจุ คือ [8]



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงท่อกทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4h+l}{4h+3l}}\right)} \quad (2.10)$$

เนื่องจากไม่สามารถวัดค่า  $C_h$  และ  $C_e$  ได้โดยตรง ดังนั้น การวัดค่าเก็บประจุภาคแรงสูง ควรจะวัดในลักษณะใช้งานจริงของโวลเตจดีโวลเตอร์ สำหรับโวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุหรือแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงอาจวัดโดยใช้ Schering bridge โดยไม่แนะนำให้ใช้ RLC bridge แรงต่ำ เพราะสายวัดและค่าเก็บประจุสเตรย์จะถูกรวมเข้าในการวัด[5] ซึ่งทำให้ค่าสเกลแพกเตอร์ที่ได้ผิดพลาด นอกจากนี้ ค่าเก็บประจุของเคเบิลวัดยังมีผลต่อสเกลแพกเตอร์ของโวลเตจดีโวลเตอร์ ซึ่งต้องนำมาเข้ามาคิดด้วย

## 2.4 โวลเตจดีโวลเตอร์

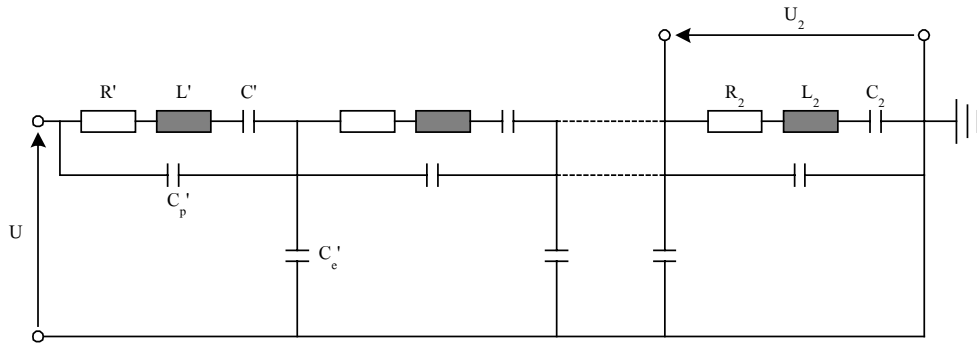
โวลเตจดีโวลเตอร์ที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงกระแสตรง กระแสสลับ หรือแรงดันอิมพัลส์ โดยทั่วไปจะประกอบขึ้นมาจาก ความต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือทั้งสองอย่างประกอบกันหลายๆชุด สำหรับการออกแบบโวลเตจดีโวลเตอร์แรงสูงจะต้องคำนึงถึง ความคงทนต่อแรงดันขององค์ประกอบ(ข้อมูลจากผู้ผลิต)และระยะฉนวนขององค์ประกอบ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามเงื่อนไขของความยาวตามผิวฉนวนของอากาศ[9]

ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดัน AC	5 m/MV	หรือ	2 kV/cm
ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์	2.5 m/MV	หรือ	4 kV/cm

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ โวลเตจดีโวลเตอร์จะได้รับการติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยรับแรงดันระบบตลอดเวลา ซึ่งโดยทั่วไปในการวัดแรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ จะใช้โวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุที่มีความต้านทานหน่วง[8]

### 2.4.1 โวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยต่อกันในลักษณะลูกโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11[8] ซึ่งตัวเก็บประจุได้รับการแทนด้วยค่าเก็บประจุ  $C'$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $L'$  ส่วนค่าความต้านทาน  $R'$  ที่ต่ออนุกรมอยู่เป็นการแทนตัวประกอบความสูญเสียในตัวเก็บประจุหรืออาจเป็นค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมเข้าไปจริง



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

ดังนั้นผลตอบสนองอนอร์มัลไลซ์สามารถเขียนได้เป็น [8]

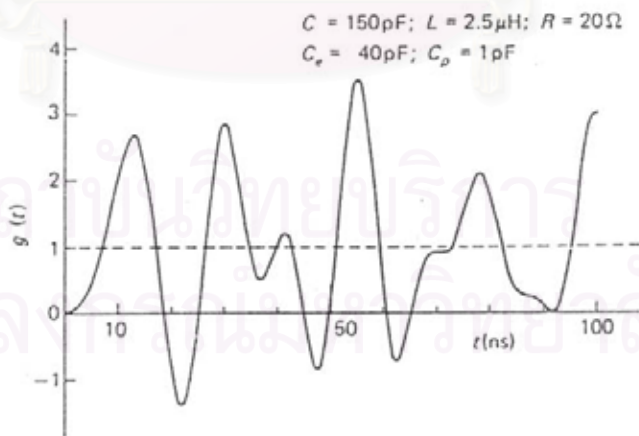
$$g(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C + C_p)} + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{AB} \tag{2.11}$$

โดยที่

$$A = \left( 1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2} \right), a = R/2L$$

$$B = \left( 1 + \frac{C_p k^2 \pi^2}{C_e} \right), b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2 \pi^2}{LC_e [1 + (C_p/C_e)k^2 \pi^2]}}$$

ตัวประกอบความสูญเสีย  $\tan \delta = \omega R' C' = \omega RC$  สามารถหาได้จากการวัด ซึ่งเมื่อแทนลงไปในสมการ (2.11) จะได้ผลตอบสนองรูปขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 2.12 [8]



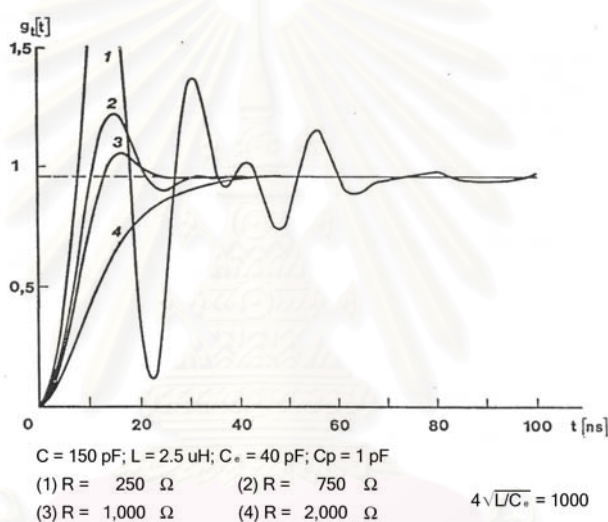
รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณ

การแกว่งที่เกิดขึ้นในผลตอบสนองรูปขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาคลื่นเดินทาง  $\tau = \sqrt{LC_e}$  ในตัวโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยประมาณจากความเร็วแสง [8] โดยความถี่ของการแกว่งสามารถหาได้จาก [10]

$$f = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2\sqrt{LC_e}} \quad (2.12)$$

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความไวต่อแรงดันขาเข้าที่มีเวลาขึ้นเร็วมากและแรงดันขาออกจะเกิดแกว่งอย่างมาก เมื่อต่อเข้าไปในระบบวัดจะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์กับสายนำ ทำให้ระบบวัดเกิดการแกว่ง ดังนั้นโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุจึงไม่สามารถที่จะวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด แต่ยังวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มได้

การปรับปรุงผลตอบสนองของรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุสามารถทำได้โดยการต่อตัวความต้านทานจริงต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ ถ้าความต้านทานมีค่าไม่สูงจนเกินไปแต่เพียงพอที่จะหน่วงการแกว่ง จะได้ผลตอบสนองของรูปคลื่นที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.13[8]



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองของรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ มีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปจะได้ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสมมีค่าเป็น

$$R = 4\sqrt{\frac{L}{C_e}} \quad (2.13)$$

และเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์สามารถคำนวณได้เป็น

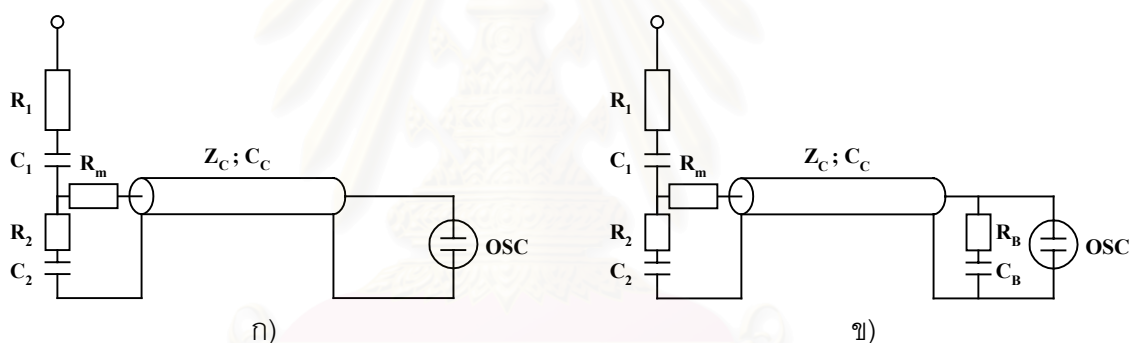
$$T_N = \frac{RC_e}{6} \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.14) จะเห็นได้ว่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้จะเร็วมากเนื่องจากความต้านทานหน่วงมีค่าต่ำ นอกจากนี้ตัวความต้านทานหน่วงก็จะไม่โหลดมาก เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านโวลเตจดีไวเดอร์เกิดจากแรงดันทรานเซียนต์ขาเข้าเท่านั้น

## 2.5 การต่อแมทซิงในภาคแรงต่ำของระบบวัด

ในการวัดแรงดันทรานเซียนต์ที่ส่งผ่านจากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัดภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ อาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันอันเนื่องจากการสะท้อนของคลื่นจร ดังนั้นจึงมีการต่อแมทซิงอิมพีแดนซ์ที่สายเคเบิลเพื่อป้องกันการสะท้อนของคลื่นจร โดยที่เคเบิลวัดจะได้รับการพิจารณาเป็นสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสีย ดังนั้นค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์  $Z_c = \sqrt{L_c/C_c}$  จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ และเวลาคลื่นเดินทาง  $\tau_c = \sqrt{L_c C_c}$  มีค่าที่แน่นอน

ในกรณีโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่มีความต้านทานหน่วง จะทำการต่อแมทซิงที่ต้นทางของเคเบิล ดังรูปที่ 2.14 ก) แรงดันที่ตกคร่อม  $R_2$  และ  $C_2$  จะถูกแบ่งครึ่งโดย  $R_m$  และ  $Z_c$  ซึ่งต่ออนุกรมกันอยู่ ( $R_m = Z_c$ ) ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมสายเคเบิลมีค่าเพียงครึ่งหนึ่ง เมื่อแรงดันวิ่งผ่านสายเคเบิลไปจนถึงปลายทางจะเกิดการสะท้อน แรงดันที่ผ่านไปยังอุปกรณ์วัดจะมีขนาดเพิ่มขึ้น 2 เท่า กลับมามีขนาดเท่าเดิม และเนื่องจาก  $R_2$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทาน  $R_1$  ค่าความต้านทานแมทซิงจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย นั่นคือ  $R_m = Z_c - R_2$



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของการต่อแมทซิงสำหรับโวลเตจดีไวเดอร์แบบต่างๆ

ก) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง แมทซิงธรรมดา

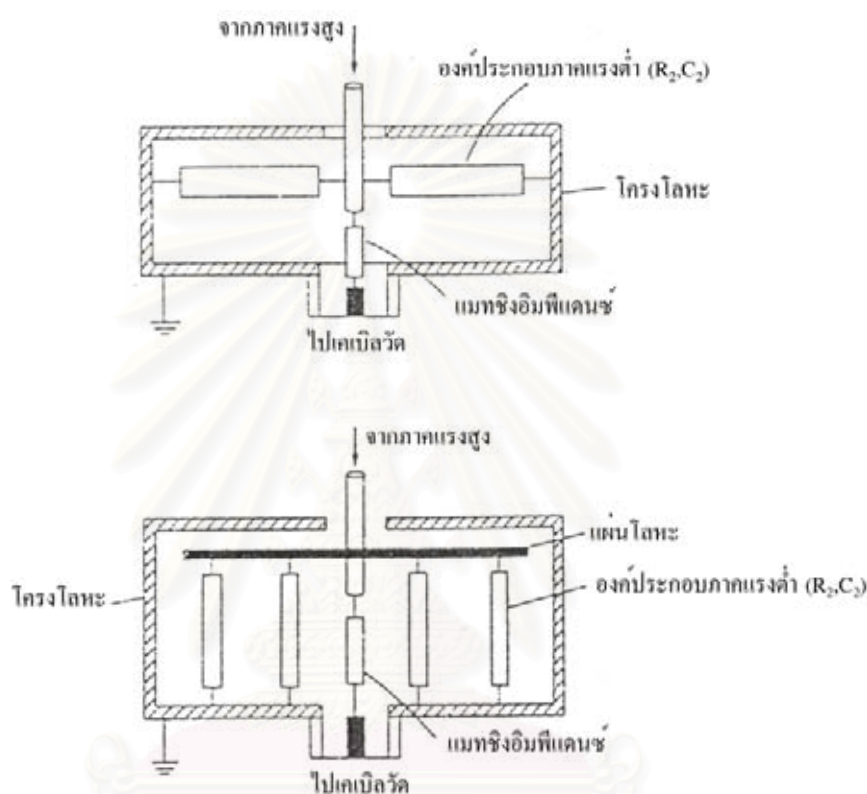
ข) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง แมทซิงชดเชย

ในทางปฏิบัติ  $C_2$  มีค่าที่แน่นอนและจะคายประจุในภาวะทรานเซียนต์ ช่วงเวลาการคายประจุมีค่าประมาณ 2 เท่าของเวลาคลื่นเดินทาง [8] หลังจากช่วงเวลานี้ ค่าเก็บประจุของเคเบิลวัดจะอัดประจุจนเต็ม จึงทำให้โวลเตจดีไวเดอร์มีค่าสเกลแฟกเตอร์ 2 ค่า คือ

$$n_0 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad \text{ที่ } t = 0$$

$$n_e = \frac{C_1 + C_2 + C_c}{C_1} \quad \text{ที่ } t \geq 2\tau_c$$

ดังนั้น เคเบิลวัดจึงทำให้เกิดส่วนพุงเกิน  $\Delta V = (n_e/n_0) - 1 = C_c/(C_1 + C_2)$  ซึ่งอาจจะทิ้งผลกระทบนี้ได้ในกรณีที่เคเบิลวัดมีขนาดสั้นหรือ  $C_2$  มีค่าสูงมากๆ อย่างไรก็ตามได้มีการเสนอให้มีการต่อแมทชิงชดเชยเพื่อลดผลกระทบจากส่วนพุงเกิน ซึ่งได้รับการนำเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Burch มีเงื่อนไขในการต่อแมทชิงชดเชยสำหรับโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง คือ  $Z_C(C_1 + C_2) = R_B(C_B + C_C)$  [11] ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ข)



รูปที่ 2.15 ภาพสเกตซ์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ

เนื่องจากตัวความต้านทานแมทชิงที่ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัดเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ ดังนั้นจึงควรระวังไม่ให้ทางลงสู่ดินของคลื่นสะท้อนมีค่าความเหนี่ยวนำสูงเกินไป ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ การต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำในลักษณะแกนร่วมเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการประกอบสร้าง รูปที่ 2.15[11] แสดงภาพสเกตซ์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ

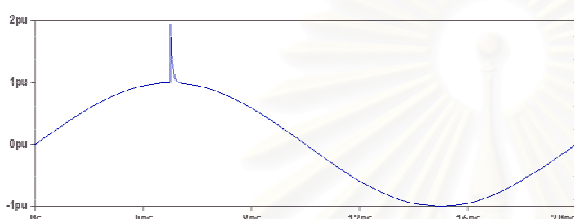


## 2.6 การตรวจจับสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่า

### 2.6.1 หน้าที่ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่า

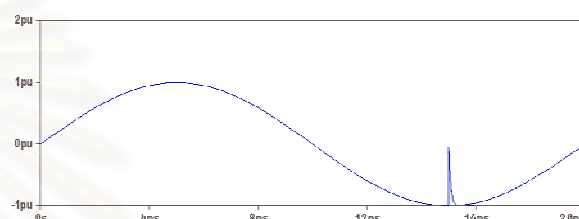
สัญญาณเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบอาจเกิด ณ ช่วงเวลาใดของสัญญาณความถี่ระบบก็ได้ โดยสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 4 กรณี คือ

- 1) เสิร์จฟ้าผ่าบวกตกคร่อมสัญญาณความถี่ระบบช่วงบวก
- 2) เสิร์จฟ้าผ่าบวกตกคร่อมสัญญาณความถี่ระบบช่วงลบ
- 3) เสิร์จฟ้าผ่าลบตกคร่อมสัญญาณความถี่ระบบช่วงบวก
- 4) เสิร์จฟ้าผ่าลบตกคร่อมสัญญาณความถี่ระบบช่วงลบ



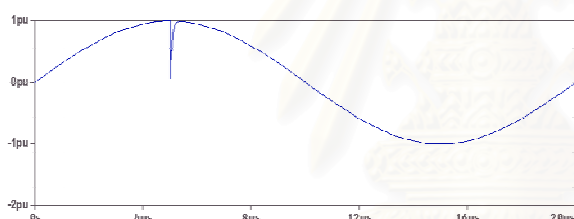
ก) เสิร์จฟ้าผ่าบวกตกคร่อมสัญญาณ

ความถี่ระบบช่วงบวก



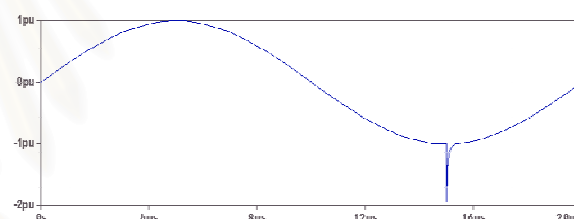
ข) เสิร์จฟ้าผ่าบวกตกคร่อมสัญญาณ

ความถี่ระบบช่วงลบ



ค) เสิร์จฟ้าผ่าลบตกคร่อมสัญญาณ

ความถี่ระบบช่วงบวก



ง) เสิร์จฟ้าผ่าลบตกคร่อมสัญญาณ

ความถี่ระบบช่วงลบ

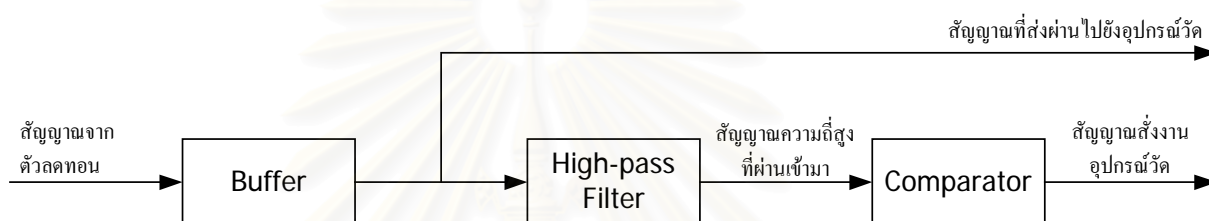
รูปที่ 2.16 สัญญาณเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาต่างของสัญญาณความถี่ระบบ

โดยทั่วไปการสั่งงานอุปกรณ์วัดจะกำหนดด้วยขนาดของสัญญาณที่เข้ามา ดังนั้นในกรณีที่เกิดสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่าลบตกคร่อมบนสัญญาณความถี่ระบบช่วงบวก (รูปที่ 2.16 ค) หากผลรวมของขนาดสัญญาณทั้งสองมีขนาดไม่สูงพอก็จะไม่สามารถสั่งงานอุปกรณ์วัดได้ จึงต้องอาศัยอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จเพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณเสิร์จที่เกิดขึ้นในระบบ และสั่งงานอุปกรณ์วัด โดยอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จจะเลือกพิจารณาเฉพาะสัญญาณเสิร์จเท่านั้น หากสัญญาณเสิร์จที่เกิดขึ้นมีขนาดเกินที่กำหนด อุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จจะสร้างสัญญาณไปสั่งให้อุปกรณ์วัดทำงาน

## 2.6.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่า

อุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จมีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.17 โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

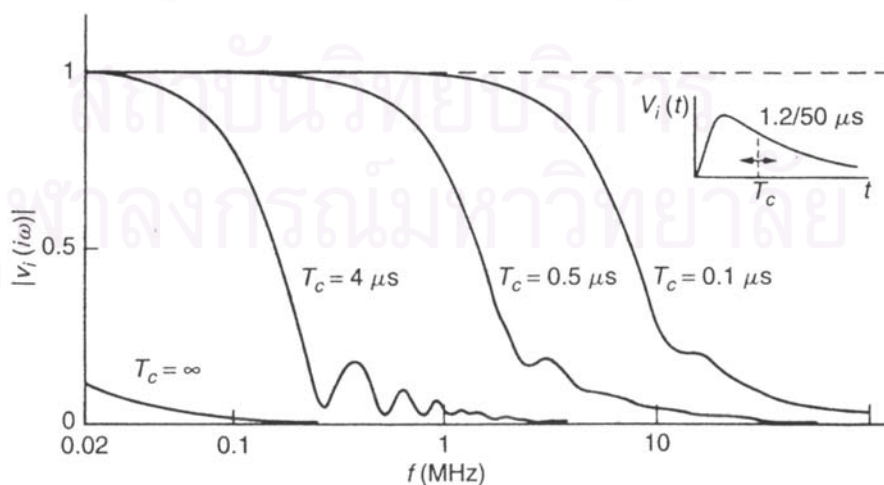
- 1) วงจรบัฟเฟอร์(buffer) ทำหน้าที่แยกวงจรเพื่อไม่ให้อินพุตของส่วนกรองความถี่สูงผ่านไปเป็นโหลดของตัวลวดทอน
- 2) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน(high-pass filter) ทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่ระบบออก จะเหลือเพียงสัญญาณความถี่สูงมาใช้ในการพิจารณา
- 3) วงจรเปรียบเทียบ(comparator) ทำหน้าที่ตรวจสอบขนาดของสัญญาณความถี่สูงที่ผ่านเข้ามา หากสัญญาณมีขนาดเกินที่กำหนดก็จะสร้างสัญญาณสำหรับส่งงานออกไป



รูปที่ 2.17 หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ

## 2.7 การวัดและบันทึกรูปคลื่นสัญญาณ

เนื่องจากแรงดันเสิร์จเป็นแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมาก ดังนั้นอุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่นจะต้องมีแบนด์วิดท์มากพอและมีช่วงเวลาดำเนินการ (rise time) เร็วพอ หากพิจารณารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน  $1.2/50 \mu\text{s}$  (รูปคลื่นเต็ม) เมื่อวิเคราะห์ออกมาในรูปของความถี่ จะพบว่ามีความถี่สูงสุดไม่เกิน  $500 \text{ kHz}$  ดังรูปที่ 2.18 [7]



รูปที่ 2.18 สเปกตรัมอัมพลิจูดของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์  $1.2/50 \mu\text{sec}$  รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัด

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้เครื่องวัดและบันทึกสัญญาณอนาล็อกสำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานเป็นอุปกรณ์ในการบันทึกสัญญาณลิเนียร์ไฟฟ้า (ได้รับการออกแบบโดยคุณ ณรงค์ ทองฉิม ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง) เนื่องจากการวัดรูปคลื่นลิเนียร์ไฟฟ้าในระบบสายส่งจำเป็นต้องตรวจจับสัญญาณอยู่ตลอดเวลา อุปกรณ์วัดจะต้องพร้อมที่จะรับและบันทึกข้อมูลตลอด ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์วัดที่มีคอมพิวเตอร์เป็นฐานจะช่วยให้การพัฒนาซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้ร่วมกันทำได้ง่ายและมีฮาร์ดแวร์ขนาดใหญ่ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลจำนวนมาก และมีคุณสมบัติที่เพียงพอในการวัดสัญญาณลิเนียร์ไฟฟ้า คือ มีแบนด์วิดท์ ช่วงเวลาขึ้น และอัตราซีกตัวอย่าง (sampling rate) ที่เพียงพอ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- 1) แบนด์วิดท์ ต้องสูงกว่าความถี่สูงสุดของสัญญาณที่วัด
- 2) ช่วงเวลาขึ้น [12]

$$\text{Rise time} \leq 0.03 T_x \quad (2.15)$$

โดยที่  $T_x$  คือ Time interval

- 3) อัตราซีกตัวอย่าง [13]

$$\text{Sampling rate} \geq 30 / T_x \quad (2.16)$$

โดยที่  $T_x$  คือ Time interval

ในกรณีของแรงดันอนาล็อกมาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{sec}$  จะมีค่า  $T_x$  เป็น 0.718  $\mu\text{sec}$  เมื่อนำคุณสมบัติที่ต้องการไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติอุปกรณ์ที่เลือกใช้ [14] จะได้ว่าอุปกรณ์ที่เลือกใช้มีคุณสมบัติเพียงพอในการวัดสัญญาณลิเนียร์ไฟฟ้า

	คุณสมบัติที่ต้องการ	คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่เลือกใช้
แบนด์วิดท์	มากกว่า 500 kHz	ประมาณ 48 MHz
ช่วงเวลาขึ้น	น้อยกว่า 20 ns	น้อยกว่า 8 ns
อัตราซีกตัวอย่าง	มากกว่า 41.78 MS/s	สูงสุด 100 MS/s

## บทที่ 3

### การออกแบบและสร้างระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า

#### 3.1 การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง เป็นแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง สามารถใช้วัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า โดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 60-2 [7] กำหนด

##### 3.1.1 เงื่อนไขในการออกแบบ

ค่าพิคกแรงดันที่กำหนดของโวลเตจดีไวเดอร์กำหนดด้วยค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นต้องการใช้ในการวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบไฟฟ้า 230 kV ซึ่งมีค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 71 [2] เท่ากับ 1050 kV ดังนั้นจึงกำหนดระดับแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์เท่ากับ 1050 kV

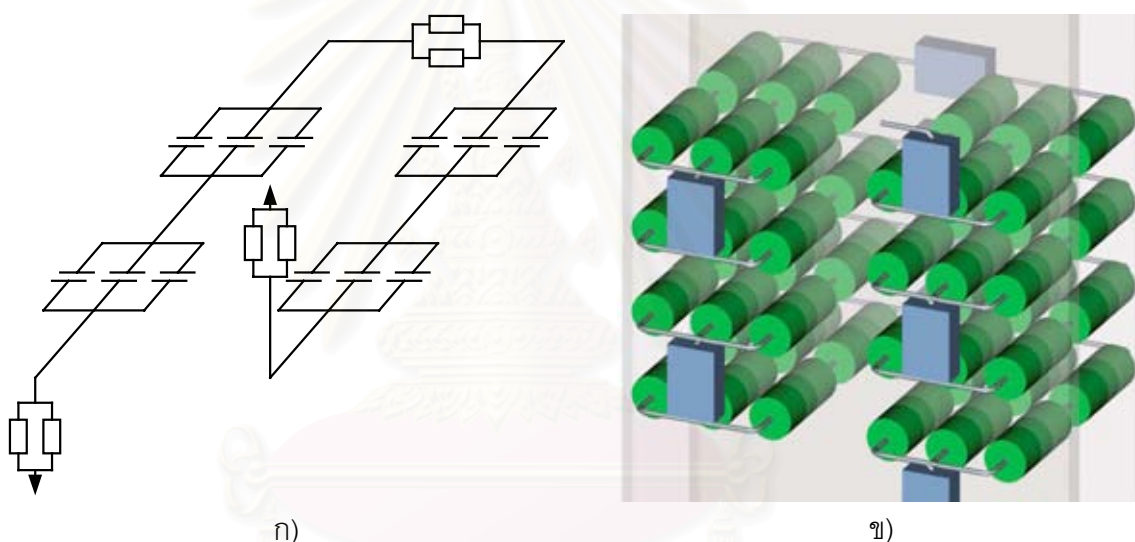
##### 3.1.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเป็นแบบตัวเก็บประจួយ่อยต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าเก็บประจุและระดับแรงดันตามต้องการ โดยค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมากพอที่ทำให้ค่าเก็บประจุสเตรย์มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ไม่มากนัก การกระจายแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ควรเป็นแบบเชิงเส้น เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจួយ่อยในภาคแรงสูงมีค่าเท่าๆกัน มิฉะนั้นอาจทำให้เกิดการเบรกดาวนำวาบไฟตามผิวที่ตัวเก็บประจួយ่อยได้ ขณะเดียวกันค่าเก็บประจุภาคแรงสูงต้องไม่มากเกินไปทำให้โวลเตจดีไวเดอร์กลายเป็นโหลดของระบบ

เนื่องจากการวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในระบบไฟฟ้าเป็นการวัดภายนอกอาคาร ดังนั้นโวลเตจดีไวเดอร์ที่นำไปใช้วัดจะได้รับการบรรจุภายในกระบอกฉนวนที่ออกแบบสำหรับใช้ภายนอกอาคาร โดยแยกบรรจุชุดตัวเก็บประจួយ่อยภายในฉนวนพอร์ซเลนแบบมีปีก 3 ท่อน(ฉนวนพอร์ซเลนได้รับความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ) แล้วนำมาต่ออนุกรมเพื่อให้ได้พิคกแรงดันตามต้องการ จะได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (d) 40 cm สูง (l) 480 cm และวางสูงจากพื้น (h) 30 cm สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุสเตรย์(สมการ 2.10) ได้ประมาณ 99 pF ค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมากกว่าค่าเก็บประจุสเตรย์พอสมควร ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงได้จากการนำตัวเก็บประจួយ่อยแบบโพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาด 0.1 $\mu$ F 2 kV<sub>dc</sub> มาต่ออนุกรมกันจำนวน 132 ชั้น แต่ละชั้นมีตัวเก็บประจួយ่อยจำนวน 4 ชุดๆ ละ 3 ตัวต่อขนานกันรวมใช้ตัวเก็บประจួយ่อย 1584 ตัว สามารถทนแรงดันได้

1056 kV<sub>dc</sub> และได้ค่าเก็บประจุรวมประมาณ 568 pF เมื่อคำนวณหาค่าเก็บประจุสมมูลของภาคแรงสูง(สมการ 2.7)จะได้ว่าผลกระทบจากค่าตัวเก็บประจุสเตรย์ต่อค่าเก็บประจุภาคแรงสูงมีค่าไม่เกิน 3%

การต่อตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงแบ่งออกเป็น 3 ท่อน แต่ละท่อนใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 528 ตัว การประกอบทำโดยใช้แผ่นพลาสติกใสหนา 10 mm ยาวตามขนาดชนวนพอร์ซีเลนที่บรรจุ จำนวน 2 แผ่นมาเจาะรูให้มีขนาดใหญ่กว่าตัวเก็บประจุย่อยเล็กน้อย ทำการเจาะรูเป็นจำนวนแผ่นละ 44 แถวๆละ 6 รู ซึ่ง 6 รูนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชุด แต่ละชุดจะนำตัวเก็บประจุย่อยสอดเข้าไป ส่วนด้านข้างและด้านบนใช้แผ่นพลาสติกใสขนาดเล็กยึด ต่อจากนั้นจึงนำตัวความต้านทานย่อยจำนวน 261 ชุดมาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุย่อยแต่ละชั้นสลับกันไป ภาพสเกทช์และภาพถ่ายการเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุย่อยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุและความต้านทานย่อยแต่ละชั้น

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าผลของค่าเก็บประจุสเตรย์ โดยตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดจะมีแรงดันตกคร่อมมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยนี้ว่าสามารถทนต่อแรงดันเมื่อโวลเตจดีโวลเดอรันใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ สมการที่ 3.1 คือสมการที่ใช้ในการพิจารณาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ โดยจะพิจารณากรณีซึ่งเกิดแรงดันตกคร่อมมากที่สุด( $R_1 = 0$ ) จากวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงในรูปที่ 2.9 เมื่อ  $U_k$  คือ แรงดันที่ตัวเก็บประจุย่อย  $k$  เทียบกับดิน

$$U_k = \frac{U}{C'_e + C'_h} \left[ \frac{C'_e \sinh \frac{\alpha k}{n}}{\sinh \alpha} + C'_h \left\{ 1 - \frac{\sinh \alpha \left( n - \frac{k}{n} \right)}{\sinh \alpha} \right\} \right] \quad (3.1)$$

โดยที่  $\alpha = \sqrt{(C'_e + C'_h)/C'}$

เมื่อ  $U = 1050 \text{ kV}$ ,  $C' = 0.3 \text{ } \mu\text{F}$ ,  $C'_e = 0.1875 \text{ pF}$ ,  $C'_h = 0$ ,  $n = 528$  จะได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดเท่ากับ  $1.993 \text{ kV}$  ซึ่งต่ำกว่าตัวเก็บประจุย่อย  $2 \text{ kV}_{dc}$  และตัวเก็บประจุย่อยนี้สามารถทนแรงดันอิมพัลส์ได้มากกว่า  $2 \text{ kV}$  เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น ดังนั้นตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ออกแบบนี้สามารถใช้งานที่แรงดันอิมพัลส์ที่เกิน  $1050 \text{ kV}$  ได้ตามต้องการ

เมื่อพิจารณาระยะห่างของตัวเก็บประจุย่อยระหว่างชั้นซึ่งจำกัดด้วยขนาดของฉนวนพอร์ซเลน ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยระหว่างชั้นมีค่ามากกว่าค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศ ( $2 \text{ kV/cm}$  สำหรับแรงดันกระแสสลับ และ  $4 \text{ kV/cm}$  สำหรับแรงดันอิมพัลส์ [9]) จึงเลือกใช้ก๊าซ  $\text{SF}_6$  เป็นฉนวนภายใน (ก๊าซ  $\text{SF}_6$  มีความเป็นฉนวนดีกว่าอากาศประมาณ 2 เท่า ที่ระดับความดันเดียวกัน [15]) ดังนั้นเมื่อนำชุดตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่เชื่อมต่อเรียบร้อยแล้วไปบรรจุในฉนวนพอร์ซเลน ซึ่งมีหน้าแปลนอะลูมิเนียมเปิดหัวท้ายทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด จะทำการบรรจุก๊าซ  $\text{SF}_6$  ลงไปภายใน

ตัวความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะต่ออยู่กับตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูง โดยต่อกระจายตลอดความยาวของภาคแรงสูง ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งการแกว่งของแรงดันนี้เกิดจากการเรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำในภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์กับค่าเก็บประจุสเตรย์ อย่างไรก็ตาม การต่อตัวความต้านทานนี้ช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดขึ้นภายในโวลเตจดีไวเดอร์เท่านั้น ส่วนการแกว่งของระบบวัดเนื่องจากความเหนี่ยวนำของสายนำกับค่าเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ยังต้องใช้ตัวความต้านทานหน่วงภายนอก โดยมีค่าประมาณเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำ ในการหาค่าความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์สามารถคำนวณจากสมการ [8]

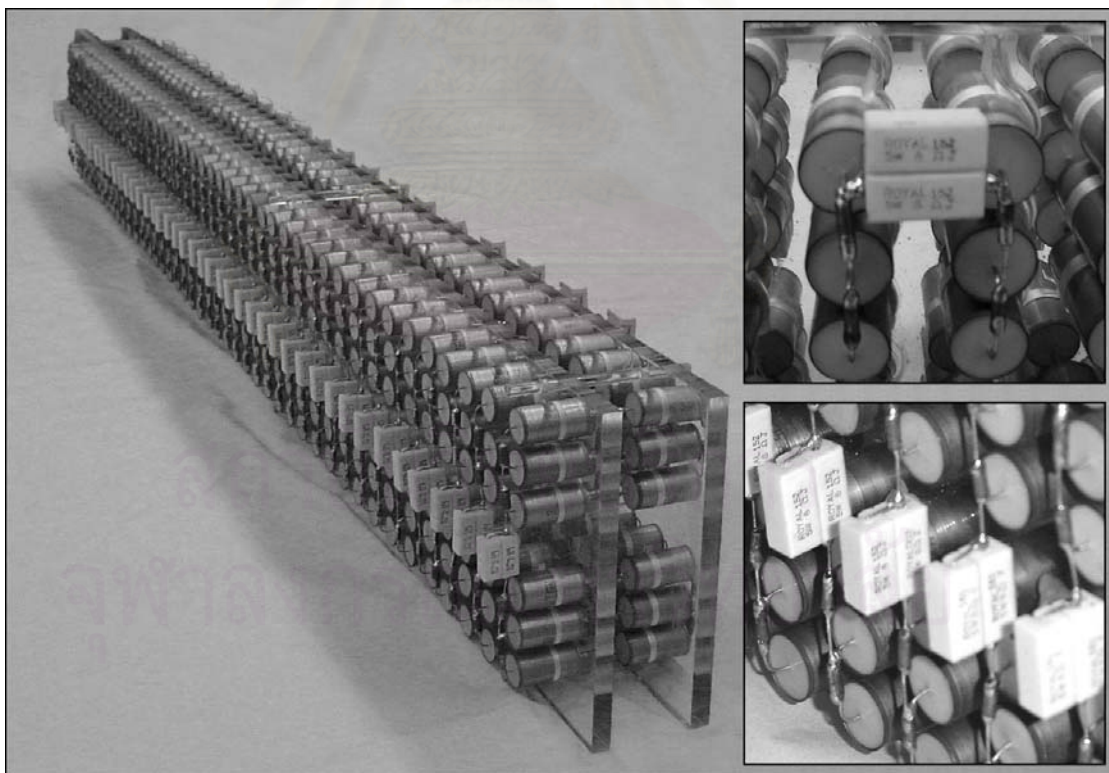
$$Z_i C_e = \tau_i \quad (3.2)$$

โดยที่  $Z_i = \sqrt{L/C_e}$  คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์

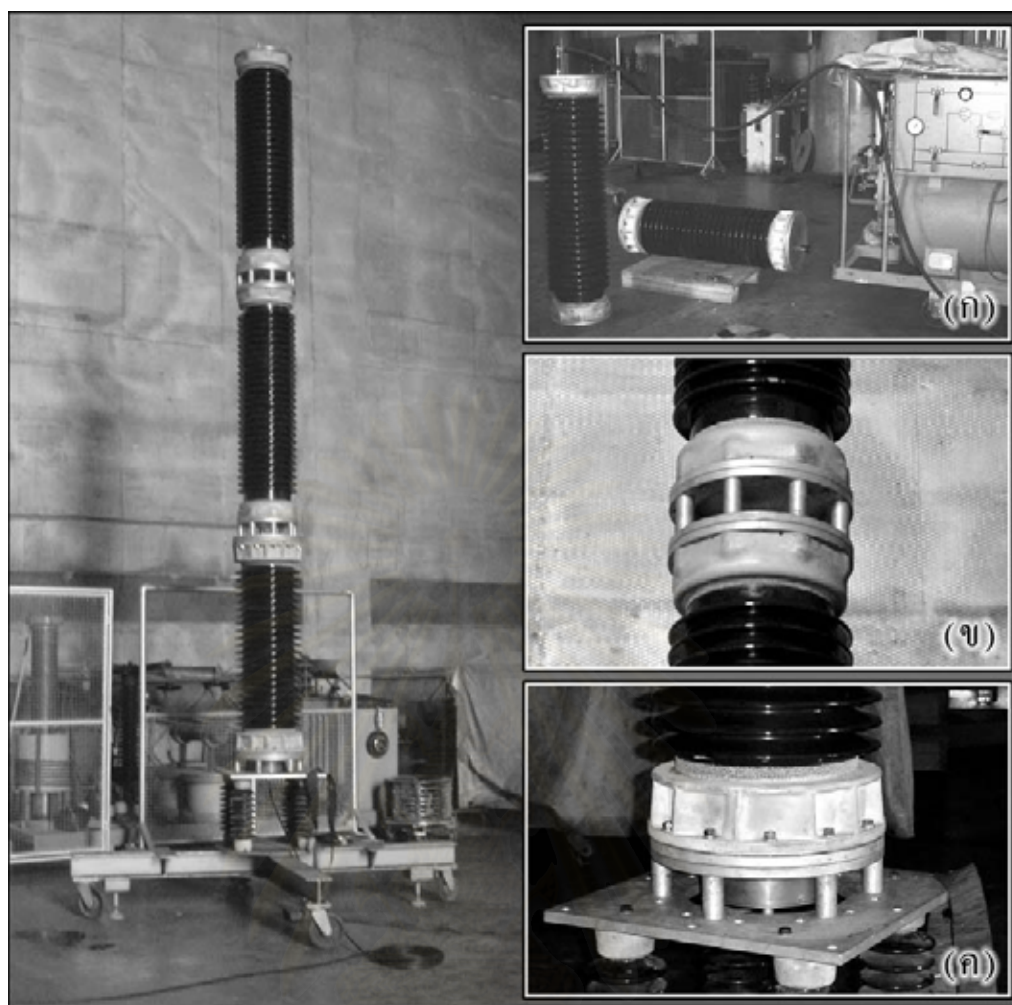
$C_e$  คือ ค่าเก็บประจุสเตรย์ของโวลเตจดีไวเดอร์

$\tau_i = \sqrt{L \cdot C_e}$  คือ เวลาคลื่นเดินทางในตัวโวลเตจดีไวเดอร์

โดยประมาณว่าคลื่นเดินทางในตัวโวลเตจดีโวลเตอร์ด้วยความเร็วแสง(3.33 ns/m) โดยโวลเตจดีโวลเตอร์ที่สร้างขึ้นมีความสูง 480 cm ดังนั้นเวลาที่คลื่นเดินทางในตัวโวลเตจดีโวลเตอร์มีค่า 15.984 ns และสามารถคำนวณค่าเก็บประจุสเตรียตามสมการ (2.10) ได้ 99 pF เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.2) จะได้ค่า  $Z_c = 161 \Omega$  และจากสมการ (2.13) จะได้ค่าความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงเป็น 644  $\Omega$  แต่จากการจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ค่าความต้านทานดังกล่าว จะยังทำให้เกิดการแกว่งที่หน้าคลื่นอยู่ เมื่อลองปรับค่าจะได้ค่าความต้านทานภาคแรงสูงที่เหมาะสมเป็น 940  $\Omega$  ซึ่งประกอบจากความต้านทานย่อยทั้งหมด 261 ชุดๆละ 2 ตัวต่อขนานกัน (เพื่อให้ทนกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้นและลดค่าความเหนี่ยวนำ) ได้ค่าความต้านทานแต่ละชุดเป็น 3.6  $\Omega$  หรือแต่ละตัวมีค่า 7.2  $\Omega$  แต่เนื่องจากในท้องตลาดไม่มีค่าที่ต้องการ จึงเลือกค่าที่ใกล้เคียงคือ 8  $\Omega$  ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความต้านทานรวมเป็น 1044  $\Omega$  โดยตัวความต้านทานที่ใช้เป็นแบบความต้านทานกระเบื้องขนาด 5 W ชุดตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่เชื่อมต่อกับความต้านทานเรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 3.2 และชุดตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ทำการบรรจุภายในฉนวนพอร์ซเลนเรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ชุดตัวเก็บประจุและความต้านทานย่อยภาคแรงสูงแต่ละท่อน



รูปที่ 3.3 ชุดตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ทำการประกอบภายในฉนวนพอร์ซเลน

- ก) เตรียมบรรจุก๊าซ SF<sub>6</sub>
- ข) บริเวณข้อต่อแต่ละชั้นของฉนวนพอร์ซเลน
- ค) บริเวณฐานที่ติดตั้งภาคแรงต่ำ

### 3.1.3 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ

#### 3.1.3.1 คุณลักษณะที่ต้องการ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงปัญหาต่างๆ ดังนี้

- 1) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในซีลด์ของสายเคเบิล หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด



2) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานเมทซิงของเคเบิลวัด ต้องระวังไม่ให้เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำที่มีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้โอิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำเข้าไปในภาคแรงสูงมีค่าลดลง ดังนั้นจึงควรจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำกับความต้านทานเมทซิงให้อยู่ในลักษณะแกนร่วม

### 3.1.3.2 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดีไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำ เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด ทำให้ทราบสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์ได้โดยอาศัยสมการ

$$F = \frac{Z_1}{Z_2} + 1 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $F$  คือ สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์

$Z_1$  คือ ค่าโอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์

$Z_2$  คือ ค่าโอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์

แรงดันขาเข้าที่กำหนดของเครื่องวัดที่ใช้จะมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 5$  V ซึ่งค่อนข้างต่ำมากดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวลดทอนเพื่อลดขนาดแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์อีกทีหนึ่ง ดังนั้นในการเลือกแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์จึงพิจารณาจากคุณสมบัติของสายสัญญาณที่นำสัญญาณจากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังตัวลดทอนแรงดัน โดยสายสัญญาณที่เลือกใช้เป็นแบบ RG11/U ซึ่งสามารถทนแรงดันได้  $600 V_{rms}$  หรือประมาณ  $850 V_{peak}$  ดังนั้นจึงเลือกแรงดันขาออกที่ 800V ซึ่งจะได้สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์มีค่าประมาณ 1312

### 3.1.3.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากค่าสเกลแฟกเตอร์ตามสมการ (3.3) และค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 568 pF ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำที่คำนวณได้มีค่าเป็น 745 nF จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาด  $2 kV_{dc}$  22 nF จำนวน 34 ตัว มาต่อขนานกันได้ค่าตัวเก็บประจรรวมเท่ากับ 748 nF และได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์เป็น 1318

เพื่อให้คุณสมบัติการถ่ายโอนของโวลเตจดีไวเดอร์สมบูรณ์และได้ผลตอบสนองของรูปคลื่นที่ดี จึงต้องต่อความต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ โดยค่าความต้านทานนี้สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้คือ

$$R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \quad (3.4)$$

จากค่าเก็บประจุภาคแรงสูง  $C_1 = 568 \text{ pF}$  และค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำ  $C_2 = 748 \text{ nF}$  ค่าความต้านทานภาคแรงสูง  $R_1 = 1044 \text{ } \Omega$  จากสมการ (3.4) จะสามารถหาค่า  $R_2$  ได้เป็น  $0.7927 \text{ } \Omega$  จึงเลือกใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ ขนาด  $2 \text{ W } 10 \text{ } \Omega$  จำนวน 17 ตัวต่อขนานกันได้ค่าความต้านทานเป็น  $0.5882 \text{ } \Omega$  นำไปต่ออนุกรมกับชุดความต้านทานที่ทำหน้าที่เป็นชุดปรับละเอียด โดยชุดปรับละเอียดจะประกอบด้วยความต้านทานขนาด  $2 \text{ W } 2 \text{ } \Omega$  จำนวน 10 ตัว ต่อขนานกัน ได้ค่าความต้านทานเป็น  $0.2 \text{ } \Omega$  ค่าความต้านทานรวมที่ได้เป็น  $0.7882$



รูปที่ 3.4 ชุดตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

- ก) บริเวณที่ใช้ต่อกับภาคแรงสูง(ด้านบน)
- ข) บริเวณที่ใช้ต่อกับสายนำสัญญาณ(ด้านล่าง)

เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวความต้านทานแมทซิ่ง( $R_m$ ) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด ความต้านทานแมทซิ่งนี้เลือกใช้แบบฟิล์มโลหะขนาด  $2 \text{ W } 150 \text{ } \Omega$  จำนวน 2 ตัว ต่อขนานกันได้ค่าความต้านทาน  $R_m = 75 \text{ } \Omega$  ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำจะได้รับการประกอบในกระบอกทองเหลือง ซึ่งมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะบรรจุองค์ประกอบภาคแรงต่ำในลักษณะของทรงกระบอกแกนร่วม ดังรูปที่ 3.4

### 3.2 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน

เนื่องจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้คอมพิวเตอรืเป็นฐาน ซึ่งอุปกรณ์วัดเองมีค่าแรงดันขาเข้าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบสร้างตัวลดทอนขึ้น เพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ลงมาให้อยู่ในย่านที่อุปกรณ์วัดสามารถรับได้

#### 3.2.1 การเลือกแรงดันขาออก

การเลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนอาศัยหลักการเดียวกับโวลเตจดีไวเดอร์ กล่าวคือ แรงดันขาออกสูงสุดของตัวลดทอน กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของอุปกรณ์วัดเมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบสเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนได้จาก

$$F = \frac{Z_3}{Z_4} + 1 \quad (3.4)$$

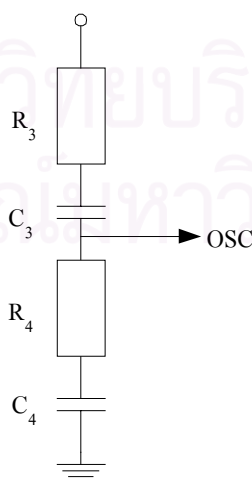
เมื่อ  $F$  คือ สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอน

$Z_3, Z_4$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวลดทอน

ในที่นี้ เลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนเท่ากับ 5 V เนื่องจากเป็นระดับแรงดันขาเข้าที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์วัดที่ใช้งาน ซึ่งจะได้สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนประมาณ 160

#### 3.2.2 ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ

จากเงื่อนไขการต่อแมทซิงชดเชยของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่เสนอโดย Burch สามารถนำมาปรับให้เป็นตัวลดทอนได้ดังวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ

โดยเงื่อนไขการต่อเมทซิงคือ

$$Z_C(C_1+C_2) = R_B(C_B+C_C) \quad (3.5)$$

โดยที่  $R_B = R_3+R_4$

$$C_B = C_3C_4 / (C_3+C_4)$$

และเงื่อนไขในการออกแบบตัวลวดทอนคือ

$$R_3C_3 = R_4C_4 \quad (3.6)$$

ซึ่งจะต้องพยายามกำหนดให้ค่าเก็บประจุเมทซิง ( $C_B$ ) มีค่าต่ำๆ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อสเกลแพกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์มากนัก จึงเลือกค่าเก็บประจุ  $C_3$  และ  $C_4$  ดังนี้

1)  $C_3$  ใช้ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ขนาด 1 kV<sub>dc</sub> 1 nF 2 ตัว และขนาด 1 kV<sub>dc</sub> 3.3 nF 1 ตัว ต่อขนานกัน ได้ค่าเก็บประจุ 5.3 nF

2)  $C_4$  ใช้ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ขนาด 160 V<sub>dc</sub> 220 nF 4 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าเก็บประจุ 880 nF

จะได้ค่าสเกลแพกเตอร์เป็น 167 และค่าเก็บประจุเมทซิง 5.268 nF เคเบิลวัดที่ใช้ยาว 150 m (ระยะห่างจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่ติดตั้ง ณ ลานไอสวิตช์ ไปยังห้องควบคุม) มีค่าเก็บประจุ 54 pF/m ซึ่งเมื่อแทนค่าลงในสมการ(3.5) จะสามารถหาค่าความต้านทานเมทซิง( $R_B$ )ได้ 4200  $\Omega$  และจากค่าสเกลแพกเตอร์ของภาคตัวเก็บประจุ 167 จึงเลือกค่าความต้านทาน ดังนี้

3)  $R_3$  ใช้ค่า 8.2 k $\Omega$  2 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าความต้านทาน 4.1 k $\Omega$

4)  $R_4$  ใช้ค่า 100  $\Omega$  4 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าความต้านทาน 25  $\Omega$  ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานเมทซิง 4125  $\Omega$  โดยตัวความต้านทานที่ใช้เป็นแบบฟิล์มโลหะ ขนาด 2 W ตัวลวดทอนแบบตัวเก็บประจุที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวลวดทอนแบบตัวเก็บประจุ

### 3.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ

เนื่องจากอุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จำเป็นต้องอาศัยสัญญาณส่งงานจากภายนอกเพื่อให้สามารถบันทึกรูปคลื่นเสิร์จฟ้าผ่าได้ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ โดยอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จจะทำการรับสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่าจากตัวลวดทอนแล้วทำการแยกสัญญาณออกเป็น 2 ทาง สัญญาณส่วนแรกจะส่งผ่านไปยังอุปกรณ์วัด ส่วนสัญญาณที่เหลือจะถูกนำมากรองสัญญาณความถี่ระบบออกเพื่อนำเฉพาะสัญญาณเสิร์จมาพิจารณาในการสร้างสัญญาณทริกที่จะไปส่งงานอุปกรณ์วัด

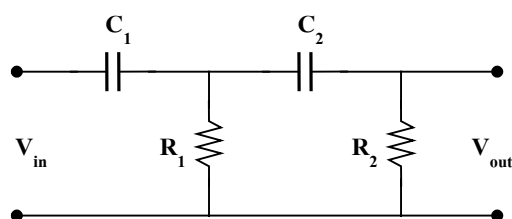
อุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จประกอบด้วย วงจรอิเล็กทรอนิกส์หลายส่วน โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และหลักการทำงานดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 วงจรบัฟเฟอร์

วงจรบัฟเฟอร์ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อินพุตของวงจรรองความถี่สูงผ่านไปเป็นโหลดของตัวลวดทอนและทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินเพื่อมิให้แรงดันอินพุตสูงเกิน  $\pm 6.2$  โวลต์ (ซีเนอร์ไดโอด 5.6 โวลต์ + ไดโอด 1N4148 0.6 โวลต์) วงจรบัฟเฟอร์จะใช้ไอซี AD811 ที่มีแบนด์วิดท์ประมาณ 140 MHz (ที่แรงดันแหล่งจ่าย  $\pm 15$  โวลต์) สัญญาณที่ผ่านวงจรบัฟเฟอร์นี้จะแยกเป็นสองทาง โดยทางหนึ่งจะส่งผ่านไปยังวงจรรองความถี่สูงผ่าน เพื่อสร้างสัญญาณส่งงานให้กับอุปกรณ์บันทึก ส่วนอีกทางหนึ่งจะส่งผ่านไปยังอินพุตของอุปกรณ์บันทึก

#### 3.3.2 วงจรรองความถี่สูงผ่าน

วงจรรองความถี่สูงผ่านทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณเสิร์จฟ้าผ่าออกจากสัญญาณความถี่ระบบ โดยในการทดลองจะกำหนดให้วงจรรองความถี่สูงผ่านทำการลดทอนสัญญาณในย่านความถี่ระบบลงไปประมาณ 100 เท่า และเพื่อไม่ให้เกิดการลดทอนสัญญาณความถี่ระบบกระทบต่อช่วงความถี่อื่นๆ จึงควรเลือกใช้วงจรรองลำดับที่ 2 ซึ่งมีอัตราการลดทอน 40 dB/decade แต่เนื่องวงจรรองลำดับที่ 2 จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะมีความยุ่งยากในการประกอบสร้าง ในที่นี้จึงเลือกใช้วงจรรองความถี่สูงผ่านลำดับที่ 1 ต่อ cascade 2 วงจร(ดังรูปที่ 3.7) เพื่อให้ได้อัตราการลดทอนตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.7 วงจรรองความถี่สูงผ่านลำดับที่ 1 ต่อ cascade 2 วงจร

อัตราขยายของวงจรรองความถี่สูงผ่านลำดับที่ 1 ในรูปของฟังก์ชันเชิงความถี่[16] คือ

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s}{s+1} \quad (3.7)$$

ค่าความถี่ประจุกและความต้านทานของวงจรรองความถี่สูงผ่านลำดับ 1 สามารถคำนวณได้จากสมการ[16]

$$\omega_c = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{R_2 C_2} \quad (3.8)$$

โดยที่  $\omega_c$  คือ ความถี่ตัดของวงจรรอง

จากสมการที่ (3.7) เมื่อนำมาเขียนในรูปของอัตราขยายของวงจรรองความถี่ผ่านลำดับที่ 1 ต่อ cascade 2 วงจร จะได้ดังสมการ

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \left(\frac{s}{s+1}\right)\left(\frac{s}{s+1}\right) = \frac{s^2}{s^2+2s+1} \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.7 สามารถแสดงอัตราขยายในรูปของ  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  และ  $C_2$  ได้ตามสมการ

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s^2}{s^2 + \left(\frac{R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2}{R_1 C_1 R_2 C_2}\right)s + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad (3.10)$$

ทำการเปรียบเทียบสมการ (3.10) กับสมการ (3.9) จะได้เงื่อนไขดังนี้

$$R_1 C_1 R_2 C_2 = 1 \quad \text{และ} \quad R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2 = 2$$

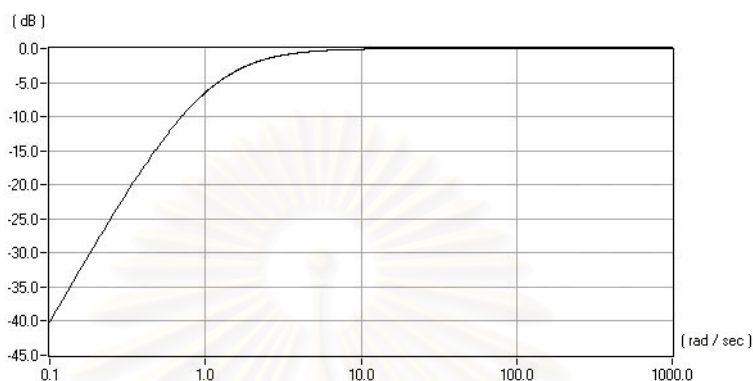
เมื่อนำสมการ (3.10) มาเขียนอยู่ในรูปของนอร์มัลไลซ์[16]  $R_1 = R_2 = C_1 = C_2 = 1$  จะไม่สามารถทำให้เงื่อนไขเป็นจริงได้ แต่สามารถทำให้ใกล้เคียงหากกำหนดให้  $R_2$  มีค่ามากกว่า  $R_1$  ค่อนข้างมาก โดยกำหนดให้  $R_2 = 10R_1$  และ  $C_1 = 10C_2$  เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.10) จะได้อัตราขยายเป็น

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s^2}{s^2 + 2.1s + 1} \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.11) เขียนฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรในรูปของความถี่เชิงมุมได้ดังสมการ

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega^2}{\sqrt{(1-\omega^2)^2 + 4.41\omega^2}} \quad (3.12)$$

จากฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ได้ หากนำมาพลอตกราฟในรูปของอัตราขยายกับความถี่เชิงมุม (รูปที่ 3.8) จะเห็นได้ว่า ที่  $\omega = 0.1$  จะได้  $|H(j\omega)| \approx -40\text{dB}$  ดังนั้นหากต้องการให้สัญญาณที่มีความถี่ 50 Hz ได้รับการลดทอนลง 100 เท่า วงจรกรองความถี่สูงผ่านที่ใช้จะมีความถี่ตัดอยู่ที่ 835 Hz ดังนั้นจะได้  $f_c$  ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านลำดับที่ 1 แต่ละวงจรเป็น 500 Hz



รูปที่ 3.8 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายกับความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

จากเงื่อนไขที่ได้ เมื่อนำมาปรับหาค่าองค์ประกอบที่สามารถจัดหาได้ จะได้ค่าต่างๆดังนี้

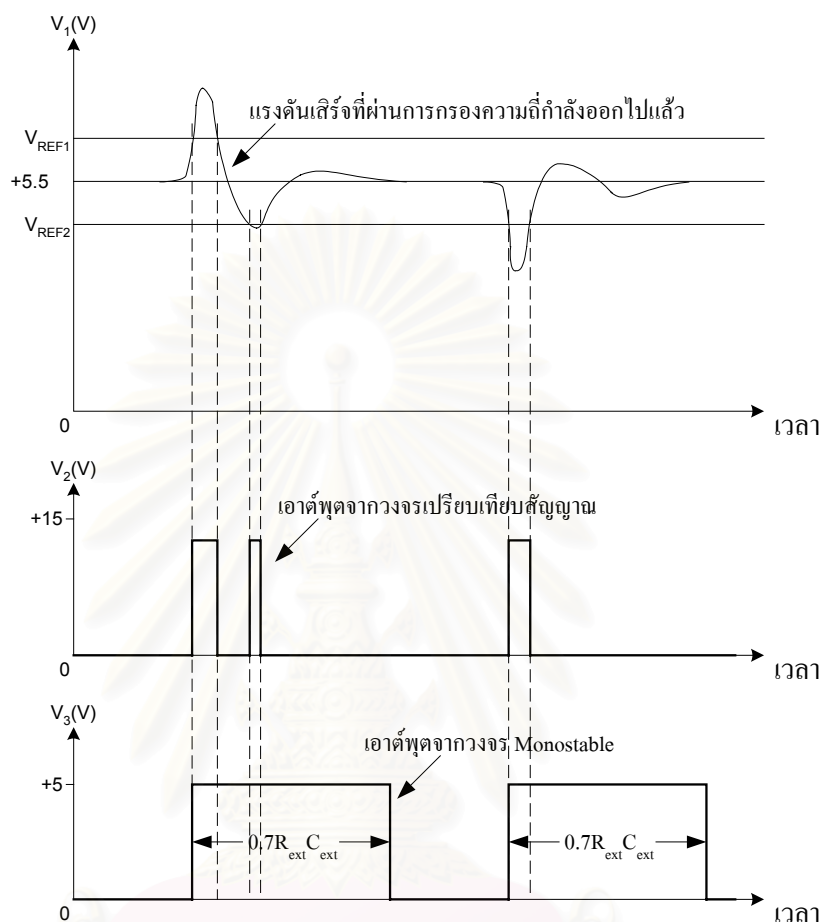
$$R_1 = 679 \Omega, C_1 = 520 \text{ nF}, R_2 = 10 \text{ k}\Omega \text{ และ } C_2 = 33 \text{ nF}$$

ในส่วนของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จะทำการยกระดับสัญญาณเสิร์จให้สูงขึ้นจากระดับ 0 โวลต์ ประมาณ 5.5 โวลต์ เพื่อให้ส่วนเปรียบเทียบสัญญาณ(comparator)สามารถเปรียบเทียบสัญญาณได้ทั้งช่วงบวกและลบ โดยจะใช้ซีเนอริไดโอด(zenor diode)เบอร์ 1N4742 ลดระดับแรงดันแหล่งจ่ายให้เหลือเพียง 11 โวลต์ และใช้  $R_2$  จากวงจรกรองความถี่สูงผ่านช่วยลดระดับแรงดันลงครึ่งหนึ่ง

### 3.3.3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณทำหน้าที่เปรียบเทียบขนาดของสัญญาณเสิร์จที่ได้รับการกรองสัญญาณความถี่ระบบออกไปแล้วกับสัญญาณอ้างอิง และทำการส่งสัญญาณพัลส์ออกทางเอาต์พุตหากสัญญาณเสิร์จที่เข้ามา มีขนาดตรงตามเงื่อนไข ในส่วนนี้จะมียังวงจรเปรียบเทียบสัญญาณอยู่ 2 ชุด เพื่อให้ในการตรวจสอบสัญญาณเสิร์จทั้งบวกและลบ โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ใน การปรับขนาดสัญญาณอ้างอิงที่ใช้เป็นเงื่อนไขให้มีค่าอยู่ในช่วง 5.738 ถึง 7.27 โวลต์ สำหรับสัญญาณเสิร์จช่วงบวก( $V_{REF1}$ ) และมีค่าอยู่ในช่วง 5.262 ถึง 3.73 โวลต์ สำหรับสัญญาณเสิร์จช่วงลบ( $V_{REF2}$ )

สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมสัญญาณเข้าด้วยกันผ่านวงจร OR Gate และสัญญาณจะถูกส่งผ่านไปยังวงจร Monostable เพื่อสร้างสัญญาณสั่งงานไปยังอุปกรณ์ถัดต่อไป



รูปที่ 3.9 การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณและวงจร Monostable

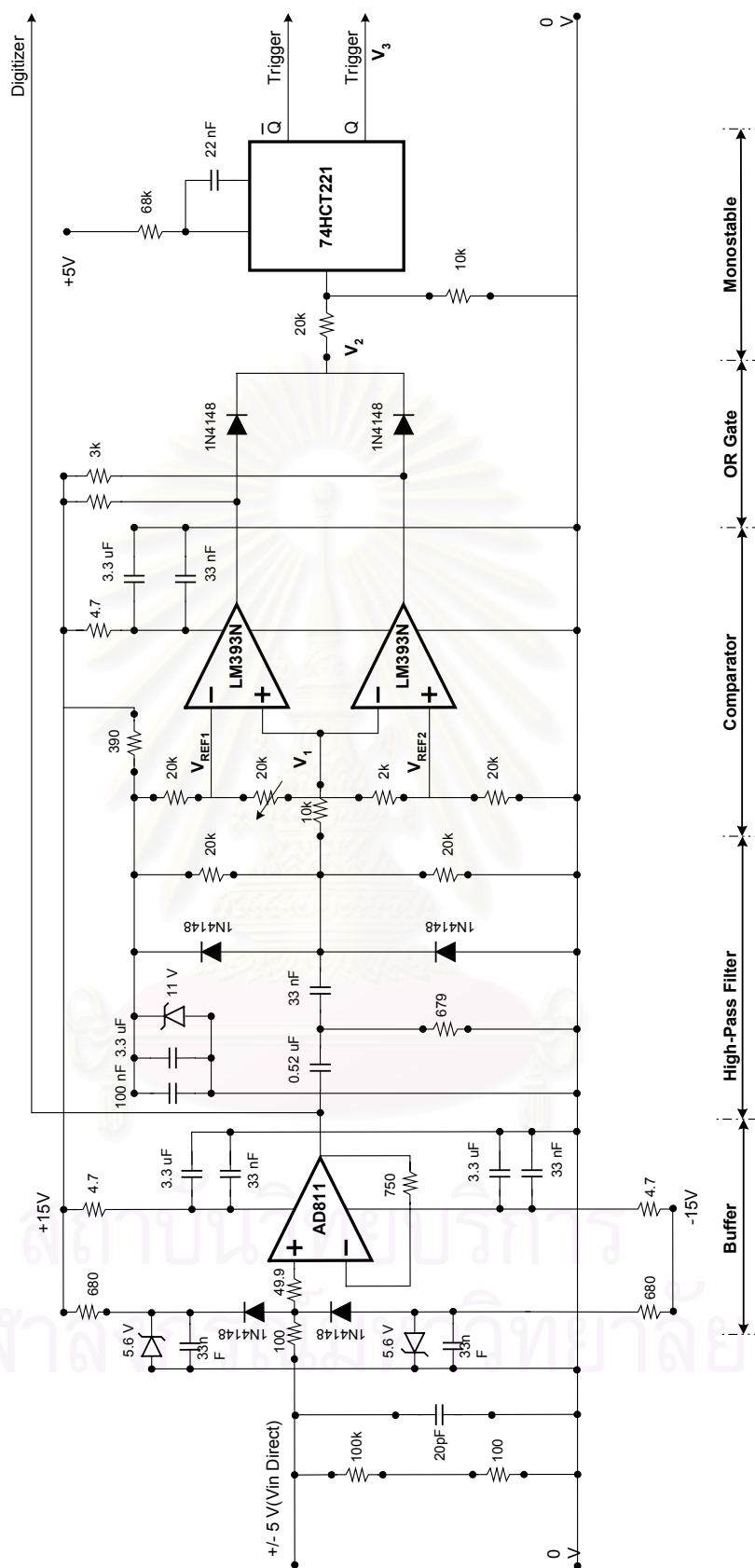
### 3.3.4 วงจร Monostable

วงจร Monostable ทำหน้าที่ปรับช่วงเวลาของสัญญาณสั่งงานให้มีขนาดคงที่ โดยอาศัยการปรับค่าความเก็บประจุและความต้านทานที่ต่อกับไอซี 74HCT221 (Dual non-retriggerable monostable multivibrator) เพื่อให้ได้ช่วงเวลาของสัญญาณทริกตามต้องการ โดยสามารถหาค่าความเก็บประจุและความต้านทานได้จากสมการ (3.13) [17]

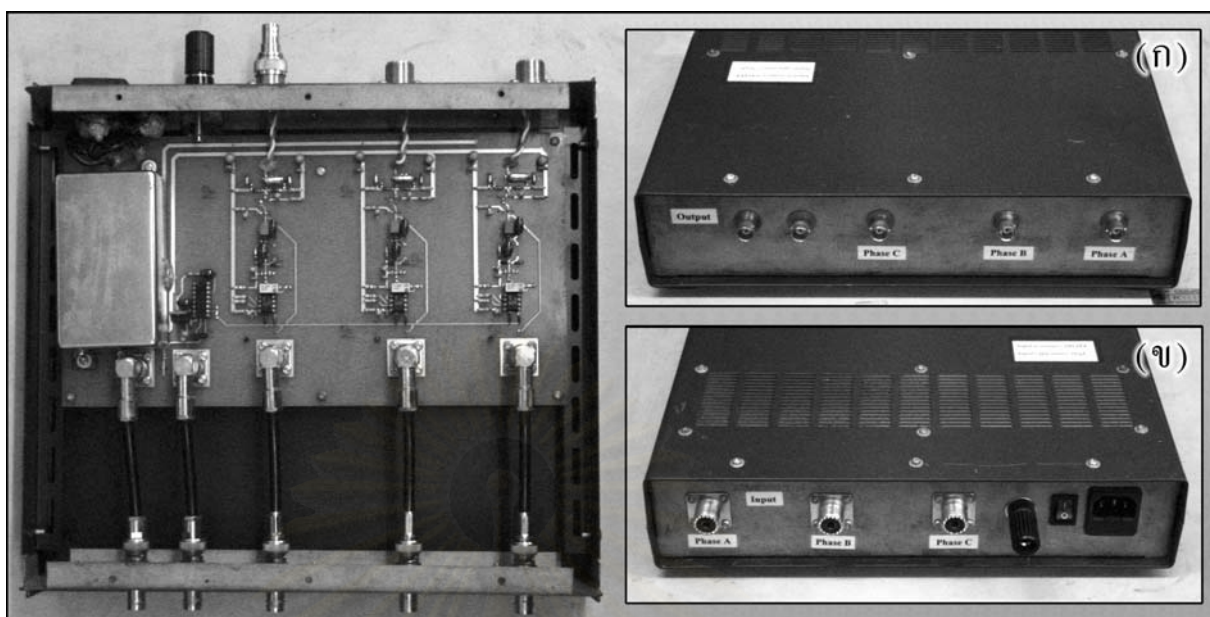
$$t_w = 0.7R_{\text{ext}}C_{\text{ext}} \quad (3.13)$$

สัญญาณพัลส์ที่ได้รับมาจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะได้รับการลดทอนลงให้อยู่ในระดับที่ไอซีทำงานได้ และหากมีสัญญาณเสิร์จเข้ามาในขณะที่วงจร Monostable สร้างสัญญาณสั่งงาน วงจร Monostable จะไม่สนใจสัญญาณใหม่ โดยจะยังสร้างสัญญาณสั่งงานที่มีช่วงเวลา ( $t_w$ ) เท่าเดิม





รูปที่ 3.10 ผังวงจรของอุปกรณ์ตรวจจับเส้นรัศ



รูปที่ 3.11 เครื่องตรวจจับสัญญาณเสิร์จ

ก) ด้านหน้า

ข) ด้านหลัง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4 อุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น

อุปกรณ์บันทึกรูปคลื่นที่เลือกใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ คือเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน ได้รับการพัฒนาโดยคุณ ณรงค์ ทองฉิม ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง[14] ข้อได้เปรียบในการเลือกใช้เครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์เป็นอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่นมีดังนี้

1) เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบโดยเฉพาะสำหรับการวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ ซึ่งเป็นลักษณะของรูปคลื่นเสิร์จฟ้าผ่า จึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการวัดรูปคลื่นเสิร์จฟ้าผ่า

2) เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่นที่มีในท้องตลาด ถึงแม้ว่าอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่นอื่น ๆ อาจมีความสามารถที่เหนือกว่าแต่ก็มีราคาสูงกว่ามาก และมีความสามารถที่เกินความจำเป็น

3) เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน ดังนั้นการพัฒนาระบบเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจะทำได้ง่าย โดยพัฒนาผ่านทางส่วนซอฟต์แวร์

เครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

จำนวนช่องสัญญาณ(Channel)	2 ช่องสัญญาณ
ระบบส่งผ่านข้อมูล	USB(12 Mbit/s)
ระบบปฏิบัติการ	Windows 2000

#### ภาคแอนะล็อก

แรงดันอินพุต	$\pm 10$ V(สูงสุด)
อินพุตอิมพีแดนซ์	100 k $\Omega$ // 20pF
เวลาขึ้น(Rise time)	< 8 ns
แบนด์วิดท์	48 MHz

#### ภาคดิจิทัล

อัตราซุ่มซึกตัวอย่างสูงสุด	100 MS/s
ความละเอียดสูงสุด(กรณีวัดทั้งสัญญาณบวกและลบ)	11 bit
หน่วยความจำ	128 kpoint

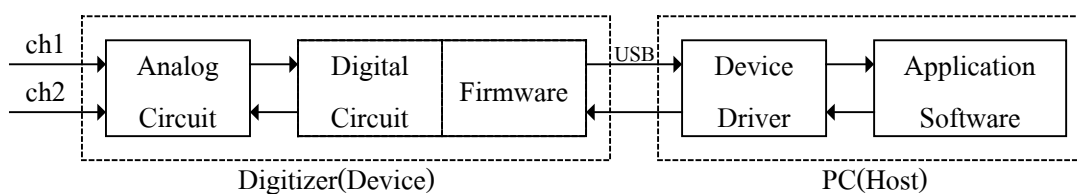
ในการใช้งานเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์จำเป็นต้องทำการประกอบสร้างขึ้นมาใช้งานเอง และจำเป็นต้องศึกษาถึงหลักการทํางานเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ทำการประกอบสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดและบันทึกกลุ่มคลื่นอิมพัลส์

### 3.4.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงาน

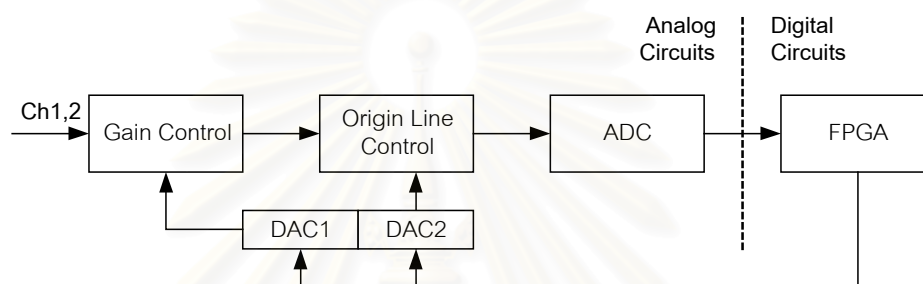
เครื่องวัดและบันทึกกลุ่มคลื่นอิมพัลส์จะประกอบด้วย วงจรภาคแอนะล็อกสำหรับใช้ในการรับสัญญาณอิมพัลส์และปรับระดับสัญญาณให้มีขนาดเหมาะสม วงจรภาคดิจิทัลโดยรวมทั้งเฟิร์มแวร์(firmware)ใช้สำหรับการควบคุมการทำงานและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ดีไวซ์ไดรเวอร์ (device driver) สำหรับเป็นตัวกลางติดต่อระหว่างวงจรวัดกับแอปพลิเคชันซอฟต์แวร์ (application software) โดยแอปพลิเคชันซอฟต์แวร์จะทำการควบคุมการทำงานของเครื่องวัด การประมวลผลและแสดงผล ซึ่งเราจะเรียกส่วนที่ประกอบเป็นอุปกรณ์ว่าดิจิทัลิเซอร์หรือด้าน Device และเรียกส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ว่าด้าน Host รายละเอียดแสดง ดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบของเครื่องวัดและบันทึกกลุ่มคลื่นอิมพัลส์

### 3.4.2 วงจรภาคแอนะล็อก

วงจรภาคแอนะล็อกในแต่ละช่องสัญญาณของดิจิตอลไฮเตอร์มีการทำงานตามไดอะแกรมในรูปที่ 3.14 และมีรายละเอียดของวงจรแสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งประกอบด้วยวงจรรขยายที่ควบคุมอัตราขยายด้วยแรงดัน(voltage control amplifier = VCA) หรือวงจร gain control, วงจรตั้งระดับแรงดันเริ่มต้น(origin line setting) หรือวงจร origin line control และวงจรเสริมเพื่อให้วงจรรภาคแอนะล็อกสมบูรณ์ยิ่งขึ้นอันประกอบด้วยวงจรรบัฟเฟอร์ วงจรแคลมป์แอมป์(clamp-amp) วงจรดีฟเฟอเรนเชียลเอ็ดดีซีไดรเวอร์(differential ADC driver) วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล(ADC) และวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก(digital to analog converter = DAC)



รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมการทำงานของดิจิตอลไฮเตอร์

รายละเอียดการทำงานของวงจรส่วนต่างๆเป็นดังนี้

- 1) วงจรรบัฟเฟอร์ ทำหน้าที่ป้องกันมิให้อินพุตของวงจรไปไหลดของสัญญาณและทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินเพื่อมิให้แรงดันอินพุตสูงเกินประมาณ  $\pm 12.7$  โวลต์
- 2) วงจรรขยายที่ควบคุมอัตราขยายด้วยแรงดัน จะใช้ไอซีเบอร์ AD 603 (Low Noise, 90 MHz Variable – Gain Amplifier) ควบคุมอัตราขยายได้ตามสมการดังนี้

$$\text{Gain (dB)} = 40V_G + 10 \quad (3.14)$$

โดยที่  $V_G$  คือ แรงดันที่ใช้ในการควบคุมอัตราขยายโดยรับแรงดันจากวงจร DAC

- 3) วงจรตั้งระดับแรงดันเริ่มต้น วงจรส่วนนี้จะใช้วงจร summing amplifier เนื่องจากวงจรส่วนนี้อาจต้องทำหน้าที่ขยายแรงดันจึงต้องเลือก operational amplifier(op-amp) แบบดิวิดิต์และ slew rate สูงเป็นพิเศษที่เรียกว่า current feedback amplifier แทนที่จะเป็น voltage feedback amplifier(ที่ใช้กันทั่วไป) เนื่องจากในกรณีที่ต้องใช้อัตราขยายสูงแบบดิวิดิต์ของ current feedback amplifier จะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจะต่างจาก voltage feedback amplifier ที่แบบดิวิดิต์จะลดลงอย่างมาก วงจรส่วนนี้จะใช้ไอซีเบอร์ AD811

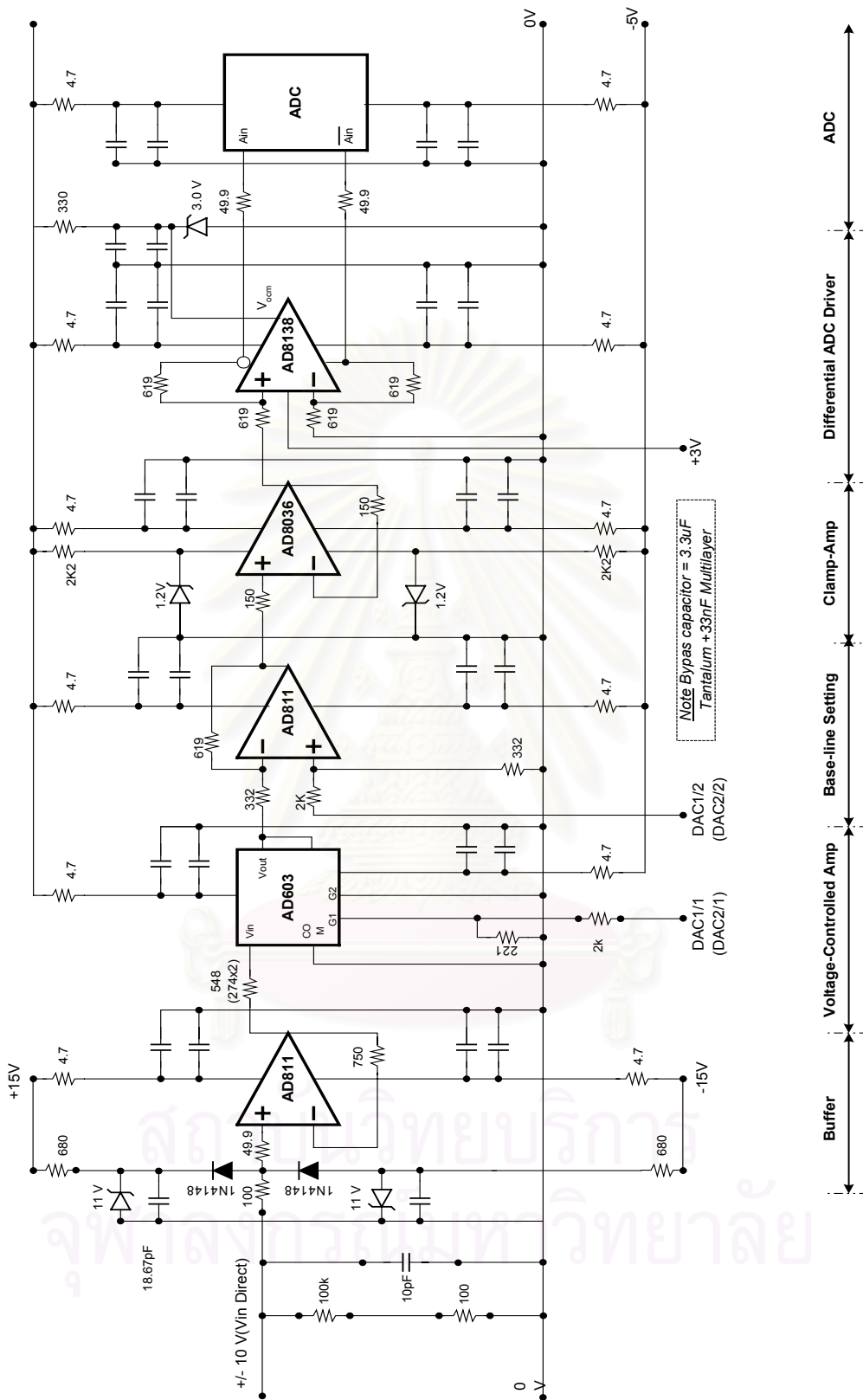
- 4) วงจรแคลมป์แอมป์จะทำหน้าที่ป้องกันแรงดันมิให้เกินกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ ในที่นี้จะใช้ไอซีเบอร์ AD8036 ซึ่งไอซีเบอร์นี้เป็น voltage feedback amplifier ที่สามารถโปรแกรมให้

แคลมป์ (clamp) แรงดันที่อินพุตด้านบวกได้ สำหรับการทำให้สัญญาณนี้จะทำการแคลมป์แรงดันสูงสุดไว้ที่  $\pm 1.2$  โวลต์ โดยใช้ไอซีเบอร์ ICL8069 เพื่อป้องกันมิให้ ADC ได้รับความเสียหายจากแรงดันอินพุตเกิน ไอซีนี้นอกจากจะทำหน้าที่แคลมป์แล้วยังทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ด้วย

5) ดิฟเฟอเรนเชียลอินพุตไอซีไดรเวอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณจากสัญญาณแบบ single-ended เป็นแบบ differential-ended เพื่อให้เหมาะสมกับแรงดันอินพุตของ ADC ในที่นี่จะใช้ไอซีเบอร์ AD8138

6) วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล(ADC) จะใช้ไอซีเบอร์ AD9432 ซึ่งมีความละเอียด 12 bit และมี sampling rate สูงสุดคือ 105 MS/s โดยสามารถรับสัญญาณอินพุตได้สูงสุด  $\pm 1$  โวลต์

เนื่องจากกำหนดให้อุปกรณ์วัดรับอินพุตสูงสุดที่  $\pm 5$  โวลต์ ในขณะที่วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลสามารถรับอินพุตเพียง  $\pm 1$  โวลต์ ดังนั้นสัญญาณเสร็จที่เข้ามาจะต้องได้รับการลดทอน ซึ่งเป็นหน้าที่ของวงจร gain control การตั้งระดับการลดทอนสามารถตั้งได้จาก DAC1 โดย DAC1 จะรับข้อมูลอินพุตในรูปแบบดิจิตอล 12 บิต ที่กำหนดจากแอปพลิเคชันซอฟต์แวร์ มาเป็นตัวกำหนดระดับแรงดันของสัญญาณแอนะล็อกที่สร้างขึ้น สัญญาณแอนะล็อกที่สร้างขึ้นจะถูกกำหนดโดยแรงดันที่ใช้อ้างอิงของวงจร DAC ในที่นี่จะมาจากไอซีเบอร์ AD586 ซึ่งมีระดับแรงดันอยู่ในช่วง  $\pm 5$  โวลต์



รูปที่ 3.15 วงจรภาคแอนะล็อกของดีจีทีเอชอาร์

### 3.4.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์แอปพลิเคชันเพื่อใช้ในการวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า

แอปพลิเคชันซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องวัดและบันทึกกลุ่มคลื่นอิมพัลส์ในการวัดแรงดันเสิร์จประกอบด้วยหน้าต่าง(window) 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนบันทึกกลุ่มคลื่นเสิร์จ ส่วนเรียกแสดงข้อมูลเสิร์จ และส่วนรายละเอียดการจัดเก็บข้อมูลเสิร์จ โดยพัฒนาขึ้นด้วยภาษา C++ ที่ใช้ Borland C++ Builder เป็นคอมไพเลอร์(compiler) ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 2000 โปรเฟสชันแนล

ในการติดต่อกับอุปกรณ์วัดจะอาศัยไฟล์ไบนารีพื้นฐานของเครื่องวัดและบันทึกกลุ่มคลื่นอิมพัลส์ที่ได้รับการพัฒนาโดยศูนย์เชี่ยวชาญอยู่ก่อนแล้ว เพื่อใช้ในการติดต่อกับดีไวซ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยลำดับการทำงานของการทำงานอ่านข้อมูลเสิร์จเป็นดังโฟลว์ชาร์ตในรูปที่ 3.16 เริ่มต้นด้วยการกำหนดและตั้งค่าตัวแปร สั่งเงื่อนไขควบคุมการทำงานของฮาร์ดแวร์ จากนั้นสั่งให้ฮาร์ดแวร์เริ่มทำงาน ให้เริ่มเก็บข้อมูล และหากมีสัญญาณเสิร์จ โปรแกรมก็จะเรียกอ่านข้อมูล ณ ช่วงเวลานั้นเข้ามา ข้อมูลที่อ่านเข้ามาจะได้รับแสดงผลผ่านหน้าจอ และโปรแกรมจะทำการตรวจเช็คเงื่อนไขการบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ หากเงื่อนไขเป็นจริงก็จะทำการบันทึกข้อมูลและเพิ่มเติมข้อมูลในหน้าต่างแสดงรายละเอียดการจัดเก็บข้อมูล จากนั้นจะสั่งให้ฮาร์ดแวร์เริ่มทำงานอีกครั้งหนึ่ง แต่หากเงื่อนไขไม่เป็นจริงก็จะจบการอ่านข้อมูลและรอการสั่งงานต่อไป

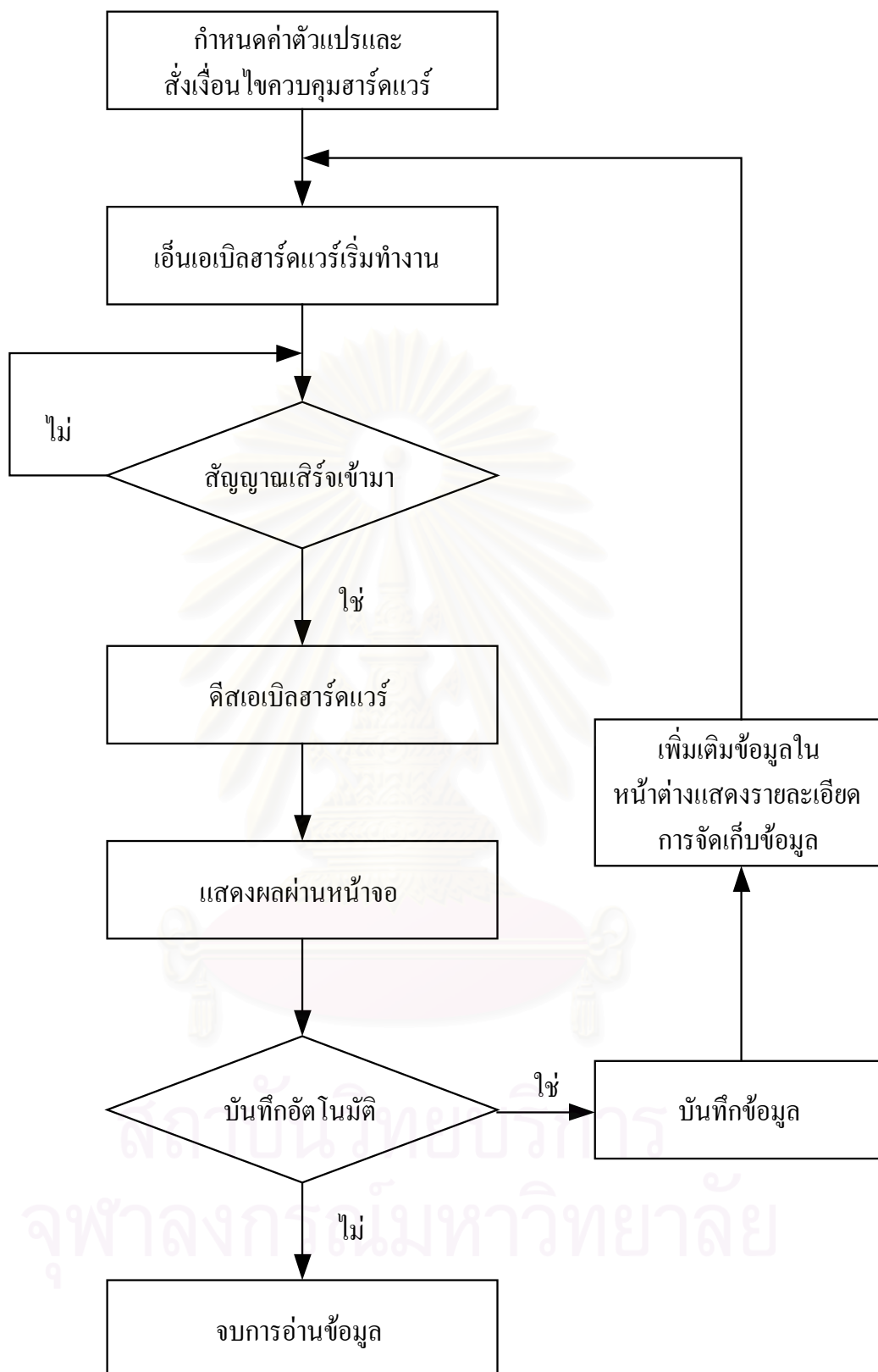
#### 3.4.3.1 ส่วนบันทึกกลุ่มคลื่นเสิร์จ

ส่วนบันทึกกลุ่มคลื่นเสิร์จอยู่ในฟอร์มของหน้าต่าง “Surge Capture” เพื่อใช้ในการบันทึกกลุ่มคลื่นเสิร์จ โดยประกอบด้วยกรอบภาพสัญญาณและปุ่มปรับเพื่อควบคุมการทำงานต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.17 โดยฟอร์มนี้ทำหน้าที่เป็นฟอร์มหลักในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์วัด การควบคุมการทำงานของฟังก์ชันต่างๆในการบันทึกกลุ่มคลื่นเป็นดังนี้

การบันทึกกลุ่มคลื่นจะเป็นการบันทึกพร้อมกันคราวละ 2 channel แต่จะเรียกดูกลุ่มคลื่นได้ครั้งละ 1 channel เท่านั้น และเมื่อจอภาพแสดงผลที่ channel ใดแล้วปุ่มควบคุมต่างๆจะเป็นของ channel นั้นด้วยรายละเอียดของปุ่มควบคุมต่างๆเป็นดังนี้

- 1) Channel จะใช้ในการเลือก channel ที่จะแสดงผลและกำหนดปุ่มควบคุมต่างๆ
- 2) Sampling rate จะเป็นการกำหนดอัตราการสุ่มจับสัญญาณรูปคลื่นเสิร์จด้วยอัตราเท่าใด โดยจะเริ่มจากค่า 100 MS/s, 50 MS/s, 25 MS/s, ..., 6.1035 KHz ตามลำดับ
- 3) Measuring range เป็นการเลือกอัตราขยายหรือ range ที่ต้องการวัดสัญญาณ โดยอัตราขยายมีค่าเริ่มจาก 1 ถึง 14 โดยอัตราขยายจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $1.25^{n-1}$  เมื่อ n คือ measuring range





รูปที่ 3.16 ลำดับการทำงานของ การอ่านข้อมูลเสร็จ

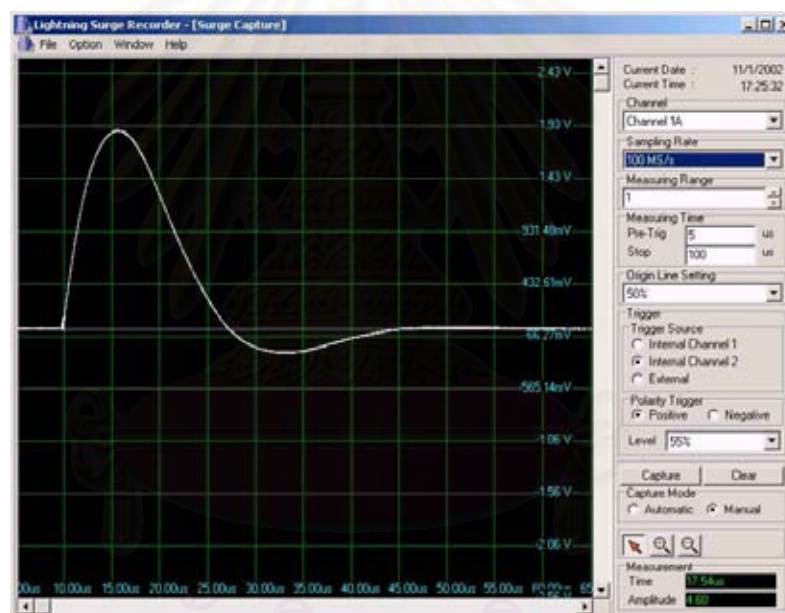
4) Measuring time เป็นการแสดงสัญญาณเฉพาะช่วงที่กำหนดตามค่า pre-trig time และ stop time โดยค่าของ pre-trig time คือ ค่าที่แสดงในช่วงเวลาก่อนจะถึงจุด trig ส่วน stop time จะแสดงเฉพาะค่าทางแกนเวลาทั้งหมดที่ปรากฏที่จอภาพ

5) Trigger เป็นการเลือกวิธีการ trig ว่าจะมาจกแหล่งใด ในกรณีที่ เป็น internal trig จะต้องกำหนดขั้ว (polarity) และ ระดับทริก (level)

6) Capture เป็นปุ่มกดเพื่อสั่งงานให้เครื่องมือวัดพร้อมที่จะบันทึกสัญญาณ

7) Clear เป็นปุ่มกดเพื่อสั่งยกเลิกการ capture หรือล้างรูปคลื่นออกจากจอภาพ

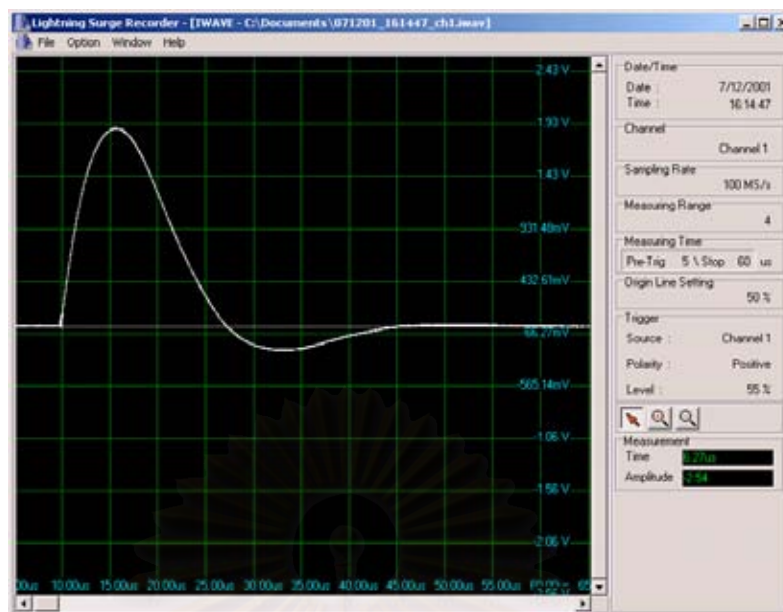
8) Capture Mode เป็นการเลือกวิธีการบันทึกข้อมูลว่าจะเป็นแบบอัตโนมัติหรือไม่ ในกรณีที่ เป็นแบบอัตโนมัติ ข้อมูลจะได้รับการบันทึกและแสดงตำแหน่งการจับเก็บในหน้าต่างรายละเอียดการจับเก็บข้อมูล หรือในกรณีที่เป็นการบันทึกด้วยตนเองจะสามารถบันทึกผ่านทางเมนู File > Save



รูปที่ 3.17 หน้าต่างส่วนบันทึกรูปคลื่นเสิร์จ

### 3.4.3.2 ส่วนเรียกแสดงข้อมูลเสิร์จ

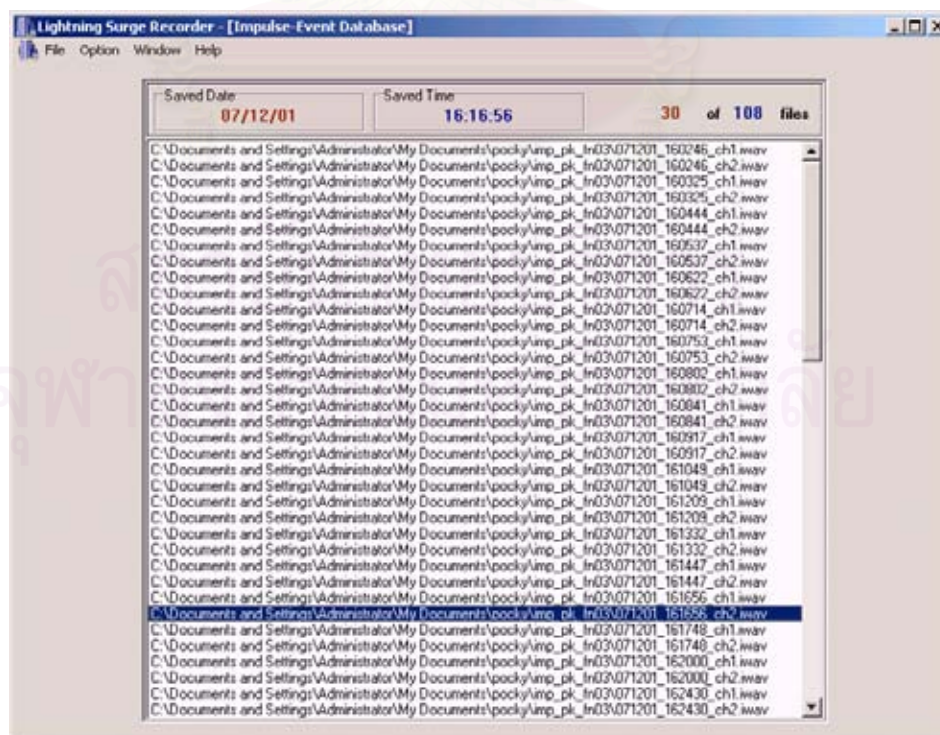
ส่วนเรียกแสดงข้อมูลเสิร์จจะอยู่ในฟอร์มส่วนของหน้าต่าง "IWAVE" เพื่อให้เรียกแสดงข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกไว้ ในการเรียกดูข้อมูลสามารถเรียกดูได้โดยตรงจากหน้าต่างรายละเอียดการจับเก็บข้อมูล หรือเรียกดูผ่านทางเมนู File > Open โดยจะแสดงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการวัดไว้ด้วย เช่น วัน, เวลา, ช่องสัญญาณ, อัตราการซุ่มซักตัวอย่าง และอื่นๆ



รูปที่ 3.18 หน้าต่างส่วนแสดงข้อมูลเล็รจ

### 3.4.3.3 ส่วนรายละเอียดการจ้ดเก็บข้อมูลเล็รจ

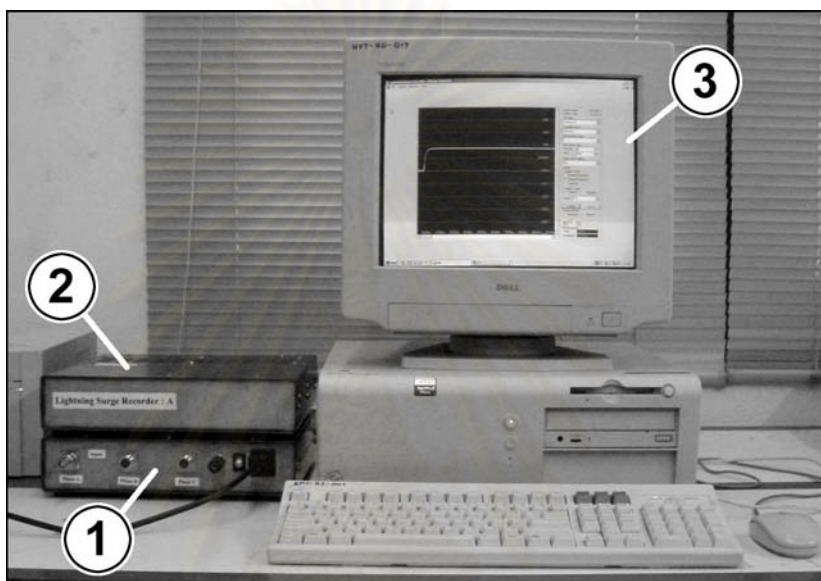
ส่วนรายละเอียดการจ้ดเก็บข้อมูลเล็รจจะอยู่ในฟอร์มส่วนของหน้าต้ง “Impulse-Event Database” เพื่อใช้แสดงรายละเอียดการจ้ดเก็บข้อมูลในกรณีที่ทำกรบันทึกแบบอัตโนมัติ ในส่วนนี้จะแสดงข้อมูลทั้งหมดที่ได้ทำกรบันทึกไว้ โดยแสดงวันและเวลาที่ทำกรบันทึกข้อมูลไว้ด้วย ในการเรียกดูข้อมูล สามารถเรียกดูได้โดยการดับเบิ้ลคลิก ณ ตำแหน่งข้อมูลนั้น ซอฟต์แวร์จะทำกรแสดงข้อมูลผ่านทางหน้าต้งแสดงข้อมูลเล็รจ



รูปที่ 3.19 หน้าต้งส่วนรายละเอียดการจ้ดเก็บข้อมูลเล็รจ

รูปที่ 3.20 แสดงองค์ประกอบทั้งหมดของระบบวัดแรงดันเสิร์จ โดยประกอบด้วย

- 1) เครื่องตรวจจับสัญญาณเสิร์จ ทำหน้าที่รับสัญญาณจากตัวลวดทอน และทำการสร้างสัญญาณส่งงานไปยังอุปกรณ์วัดเมื่อมีสัญญาณเสิร์จเข้ามา (หัวข้อ 3.3)
- 2) อุปกรณ์วัดและบันทึกที่รูปเสิร์จ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปแสดงผลและบันทึกลงเครื่องคอมพิวเตอร์ (หัวข้อ 3.4)
- 3) คอมพิวเตอร์เพื่อใช้แสดงผลและบันทึกสัญญาณเสิร์จ



รูปที่ 3.20 องค์ประกอบทั้งหมดของระบบวัดแรงดันเสิร์จ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินผล

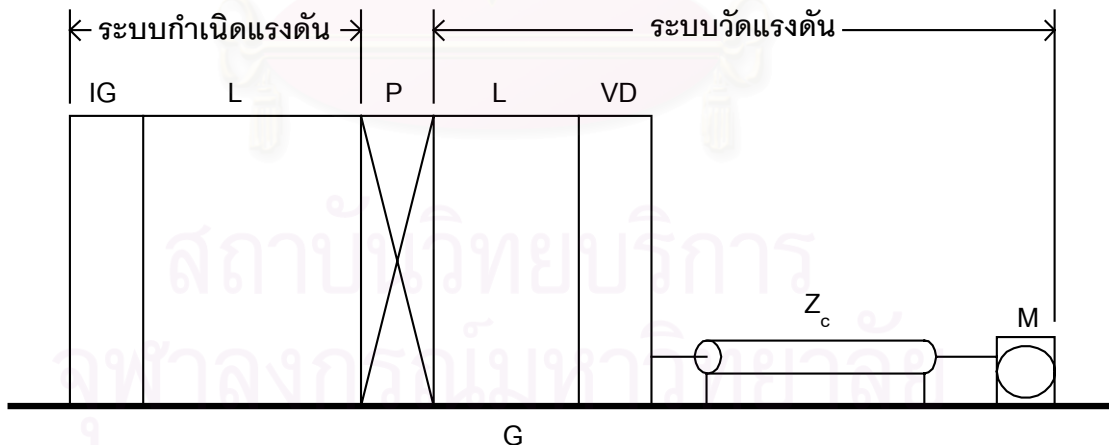
#### 4.1 การทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ทำการออกแบบสร้างจะต้องได้รับการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 71 และ IEC 60-2 เพื่อให้แน่ใจได้ว่า โวลเตจดีไวเดอร์มีความปลอดภัยเพียงพอที่จะนำไปติดตั้งใช้งานภายในระบบและมีคุณสมบัติเพียงพอในการตรวจวัดแรงดันเส้นรีจไฟฟ้าได้ตามที่มาตรฐานกำหนด

การทดสอบตามมาตรฐานนี้ได้รับความร่วมมือจากกรไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในการเชื้อเพลิงสถานที่และอุปกรณ์ทดสอบ โดยทำการทดสอบ ณ ห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง สถานีไฟฟ้าอ้อยบางพลี มีการทดสอบดังนี้

##### 4.1.1 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

ตามมาตรฐาน IEC 71 ได้กำหนดให้มีการทดสอบการชนวนของอุปกรณ์ โดยการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ 230 kV มาตรฐานได้กำหนดให้ทำการป้อนแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน(1.2/50  $\mu$ s) ที่ค่ายอด 1050 kV จำนวน 15 ครั้ง ทั้งชั่วคราวและชั่วคราว

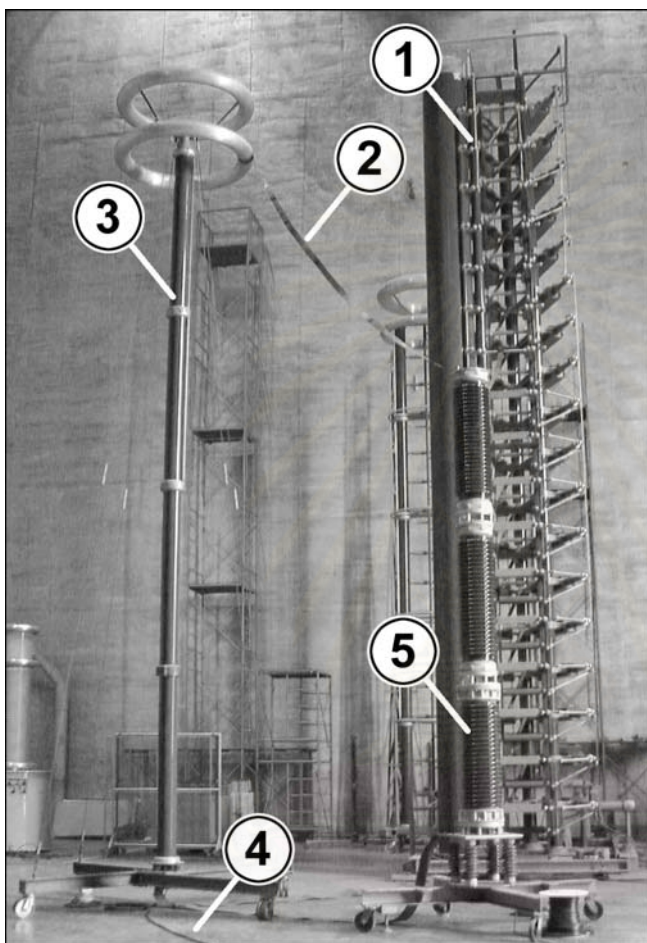


รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ ประกอบด้วย

- 1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์(Impulse voltage generator) : IG
- 2) สายนำ : L
- 3) โวลเตจดีไวเดอร์ : VD

- 4) เคเบิลวัด :  $Z_c$
- 5) อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น : M
- 6) ระบบสายดิน : G
- 7) วัสดุทดสอบ : P ในที่นี้คือโวลเตจดีโวลเตอร์ที่ทำการประกอบสร้าง



อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1 : เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

2 : สายนำ

3 : อิมพัลส์โวลเตจดีโวลเตอร์

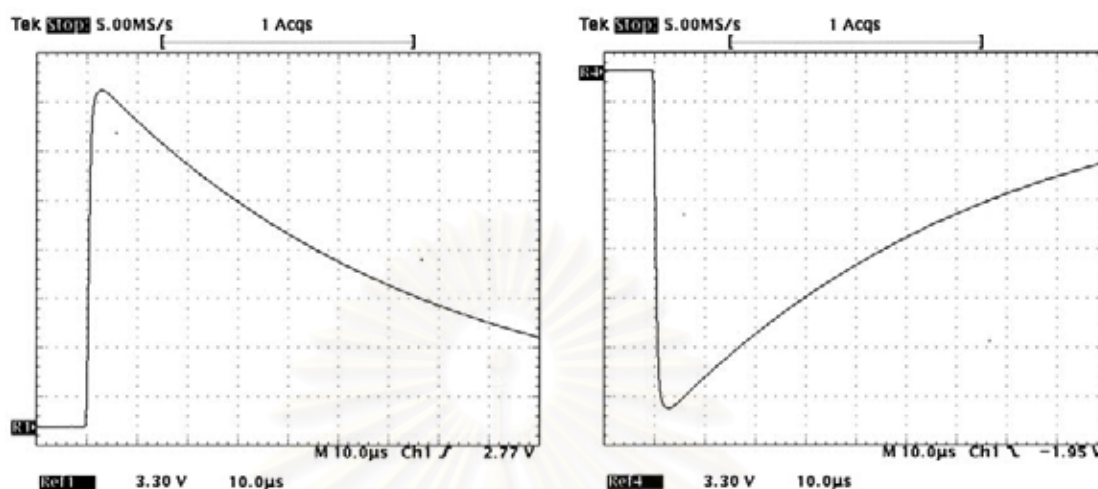
4 : เคเบิลวัด

5 : วัสดุทดสอบ ในที่นี้คือโวลเตจดีโวลเตอร์ที่ทำการประกอบสร้าง

รูปที่ 4.2 การทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์

ระบบกำเนิดแรงดันที่ใช้เป็นเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 18 ชั้น 3,600 kV, 180 kJ (HAEFELY) โดยในการทดสอบจะต่อใช้งานเพียง 10 ชั้น ที่แรงดันชาร์จ(charging voltage)ต่อชั้น ประมาณ 118 kV ในส่วนของระบบวัดแรงดันจะใช้อิมพัลส์โวลเตจดีโวลเตอร์ที่มีอัตราการลดทอน 1078.97 ต่อผ่านตัวลดทอนที่มีอัตราการลดทอน 42.82 ก่อนผ่านเข้าออสซิลโลสโคป รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.3 โดยมีเวลาหน้าคลื่น  $1.3 \mu\text{s}$  และเวลาหลังคลื่น  $49.2 \mu\text{s}$

จากการทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ โวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการประกอบสร้างขึ้นสามารถผ่านการทดสอบโดยไม่เกิดความผิดปกติใดๆ ระดับแรงดันในการทดสอบแต่ละครั้งเป็นดังตารางที่ 4.1



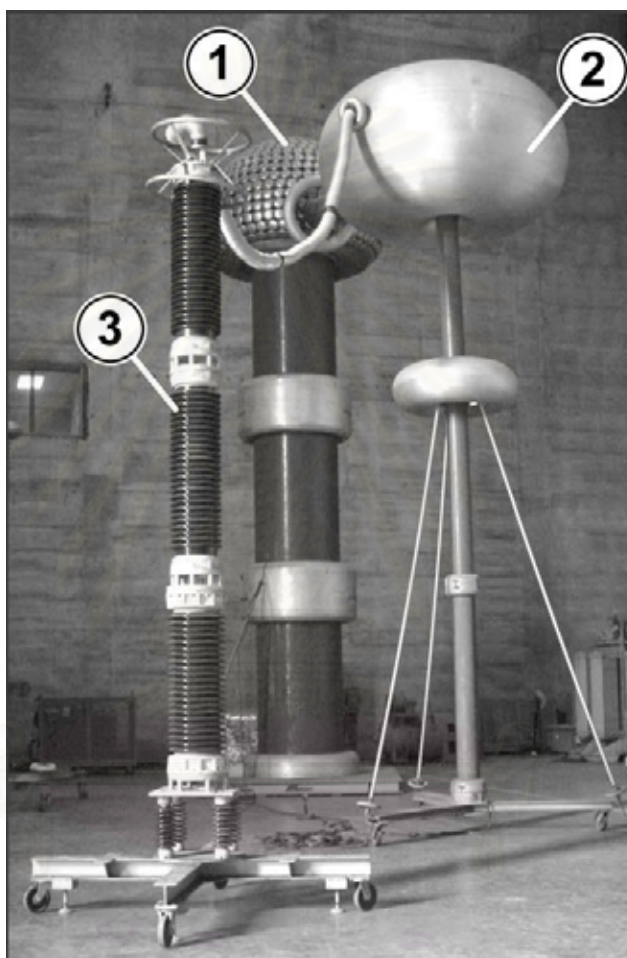
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 4.1 ระดับแรงดันในการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

	ขั้วลบ	ขั้วบวก
1	-1.053 MV	1.056 MV
2	-1.053 MV	1.056 MV
3	-1.054 MV	1.056 MV
4	-1.054 MV	1.057 MV
5	-1.053 MV	1.057 MV
6	-1.053 MV	1.057 MV
7	-1.051 MV	1.056 MV
8	-1.052 MV	1.056 MV
9	-1.052 MV	1.056 MV
10	-1.053 MV	1.056 MV
11	-1.051 MV	1.056 MV
12	-1.053 MV	1.056 MV
13	-1.053 MV	1.057 MV
14	-1.053 MV	1.057 MV
15	-1.053 MV	1.057 MV
ค่าเฉลี่ย	-1.0528 MV	1.0564 MV

#### 4.1.2 การทดสอบความคงทนระยะสั้นความถี่ต่ำ

การทดสอบความคงทนระยะสั้นความถี่ต่ำสำหรับระบบไฟฟ้า 230 kV ตามมาตรฐาน IEC 71 ได้กำหนดให้ทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ ความถี่ระบบ ที่ระดับแรงดันที่กำหนดเป็นระยะเวลา 1 นาที ระดับแรงดันที่กำหนดในการทดสอบจะมีด้วยกันหลายค่าขึ้นอยู่กับระบบสายดินที่นำอุปกรณ์ไปใช้งาน ในการทดสอบนี้จะทดสอบที่ระดับแรงดัน 325 kV<sub>r.m.s.</sub>



รูปที่ 4.4 การทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำ ประกอบด้วย

- 1) หม้อแปลงทดสอบ พิกัด 1,200 kV 900 kVA
- 2) โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 1,200 kV
- 3) วัสดุทดสอบ ในที่นี้คือโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการประกอบสร้าง

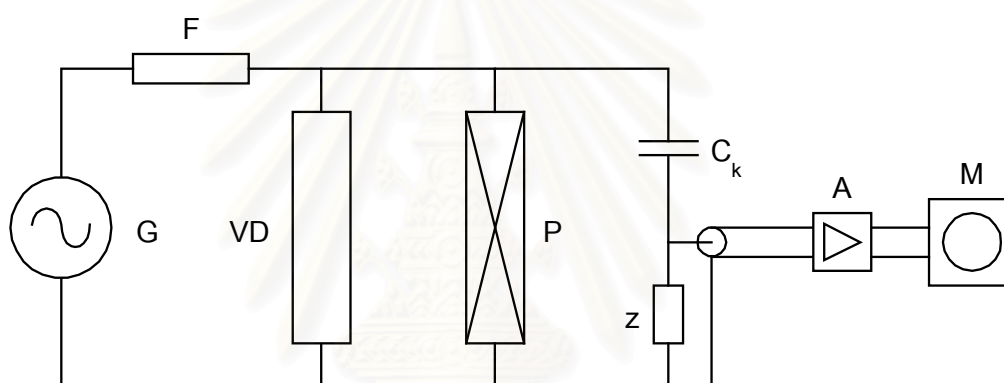
จากการทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำ โวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการประกอบสร้างขึ้นสามารถผ่านการทดสอบโดยไม่เกิดความผิดปกติใดๆ



#### 4.1.3 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณภาพของฉนวนภายในของอุปกรณ์ การที่ฉนวนภายในที่ไม่สมบูรณ์อาจทำให้เกิดการดีสชาร์จบางส่วนขึ้น (Partial Discharge) ซึ่งผลของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน นอกจากจะเป็นพลังงานสูญเสียไปแล้ว ยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการฉนวนอันจะนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ได้ในที่สุด อุปกรณ์ที่จะนำไปติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูงจะต้องผ่านการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนก่อน โดยต้องมีค่าน้อยกว่า 10 pC[18] สำหรับโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

วงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.5 โดยทำการต่อตัวเก็บประจุคัปปลิง ( $C_k$ ) ขนาด 1,036 pF 800 kV ขนานเข้าไปกับวงจรในรูปที่ 4.4 โดยทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ ความถี่ระบบ ที่ระดับแรงดัน 1.1 เท่าของ  $U_{ph}$  หรือคิดเป็น 156 kV<sub>r.m.s.</sub> เป็นระยะเวลา 15 นาที



รูปที่ 4.5 วงจรตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน

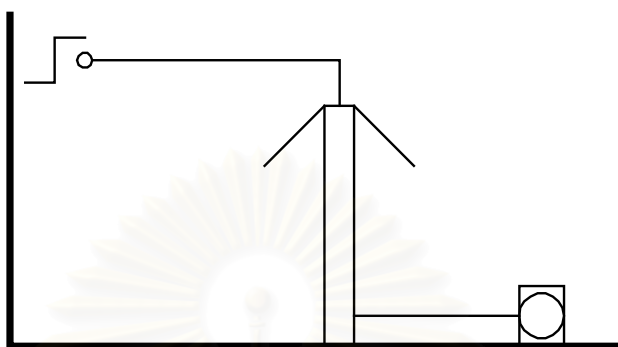
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำ ประกอบด้วย

- 1) หม้อแปลงทดสอบ : G
- 2) ตัวกรองความถี่สูง : F
- 3) โวลเตจดีไวเดอร์ : VD
- 4) วัสดุทดสอบ : P ในที่นี้คือโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการประกอบสร้าง
- 5) ตัวเก็บประจุคัปปลิง :  $C_k$
- 6) อิมพีแดนซ์วัด : z
- 7) คัปปลิงดีไวซ์ : A
- 8) เครื่องวัด PD : M

จากการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการประกอบสร้างขึ้น ไม่ปรากฏการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันทดสอบ

#### 4.1.4 การหาผลตอบสนองของรูปขั้น

วงจรถามหาผลตอบสนองของรูปขั้นในที่นี้ใช้วงจรถามหาผลตอบสนองในรูปที่ 2.6ก) ตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60-2 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น(Unit step generator)ของ HAEFELY รุ่น USG 40



รูปที่ 4.6 วงจรถามหาผลตอบสนองของรูปขั้น

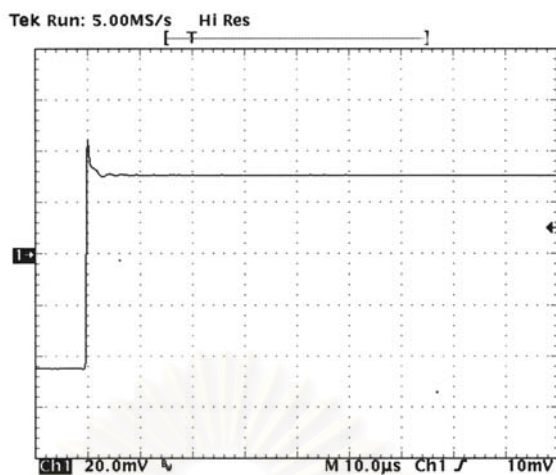
##### 4.1.4.1 โวลต์เตจดีไวเดอร์

ในการวัดผลตอบสนองของรูปขั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการประกอบสร้างจะทำการวัดสองครั้ง โดยครั้งแรกจะใช้สายเคเบิลนำสัญญาณสั้นเพื่อดูผลตอบสนองของโวลต์เตจดีไวเดอร์และทำการปรับค่าความต้านทานด้านแรงต่ำ( $R_2$ )เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามต้องการ รูปที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของรูปขั้นก่อนทำการปรับค่าความต้านทานทางด้านแรงต่ำ ผลตอบสนองจะมีลักษณะของการชดเชยเกิน จึงทำการปรับลดค่าความต้านทานปรับละเอียดทางภาคแรงต่ำให้มีค่าเพียง  $0.1333 \Omega$  ได้ค่าความต้านทานรวมทางภาคแรงต่ำเป็น  $0.7215 \Omega$  และได้ผลตอบสนองของรูปขั้นดังรูปที่ 4.8 ในครั้งที่สองจะใช้สายเคเบิลนำสัญญาณที่จะใช้จริงในระบบวัดซึ่งมีความยาว 150 เมตร ได้ผลตอบสนองของรูปขั้นตามรูปที่ 4.9

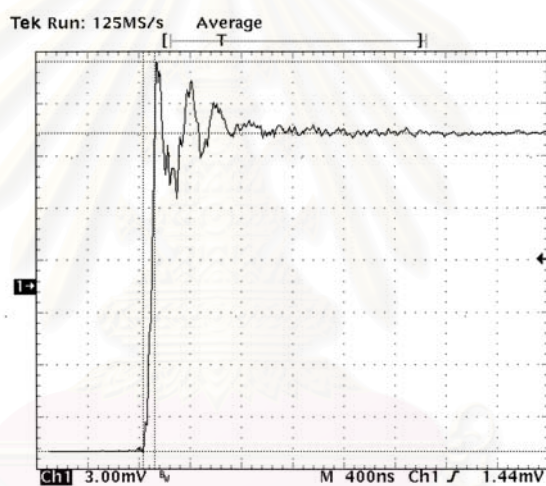
จากผลตอบสนองของรูปขั้นในรูปที่ 4.8 และ 4.9 เมื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองในกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ได้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ผลตอบสนองในกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น โดยคิดเวลาหน้าคลื่น  $T_1 = 0.8 \mu s$  (ดูรูปที่ 2.8)

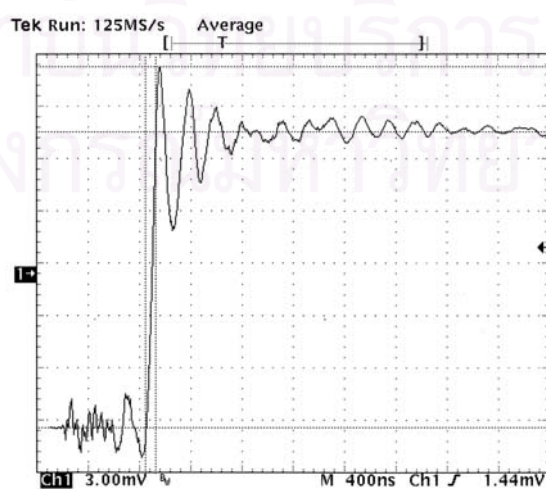
	$T_a / T_1$	$\beta(\%)$	
		จากการทดสอบ	มาตรฐานกำหนด
สายเคเบิลสั้น	0.056	22.95	$\leq 46.66$
สายเคเบิลยาว (150 เมตร)	0.050	22.80	$\leq 53.33$



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์ก่อนปรับค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ



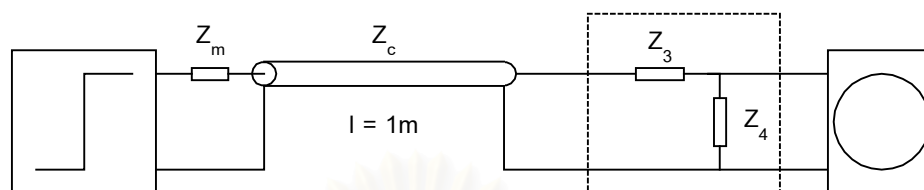
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองของรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์ เมื่อต่อสายเคเบิลนำสัญญาณ 150 เมตร

#### 4.1.4.2 ตัวลวดทอง

วงจรที่ใช้ในการหาผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทองแสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะได้ผลตอบสนองรูปขึ้นดังรูปที่ 4.11



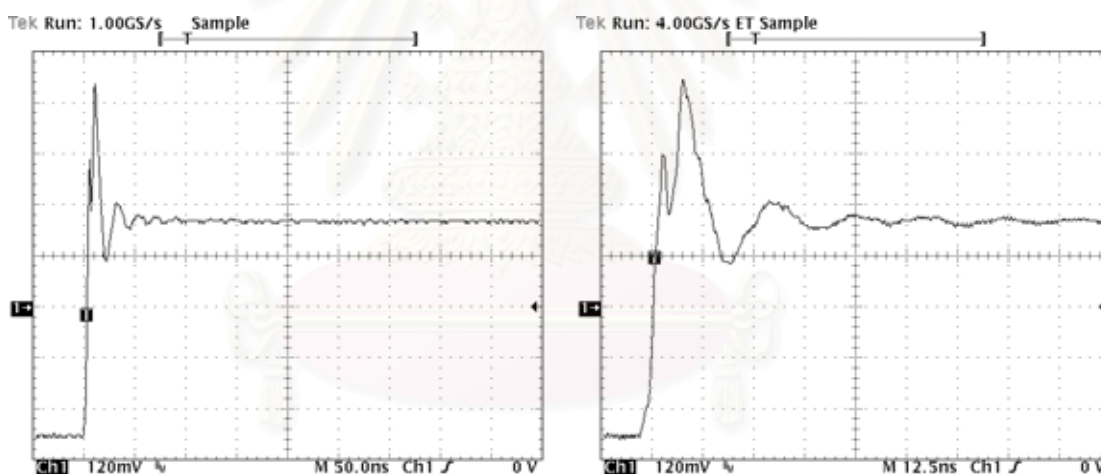
รูปที่ 4.10 วงจรผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอง

$Z_c$  คือ เคเบิลวัด  $75 \Omega$  ยาว 1 เมตร

$Z_m$  คือ แมทซิ่งอิมพีแดนซ์ มีค่าเท่ากับ  $Z_c$

$Z_3$  คือ อิมพีแดนซ์ภาคปฐมภูมิของตัวลวดทอง

$Z_4$  คือ อิมพีแดนซ์ภาคทุติยภูมิของตัวลวดทอง



ก) ช่วงเวลา/ช่อง มีค่าเท่ากับ 50 ns

ข) ช่วงเวลา/ช่อง มีค่าเท่ากับ 12.5 ns

รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอง

จากรูปคลื่นผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอง รูปที่ 4.11ก) และ 4.11ข) ได้ค่าเวลาขึ้นประมาณ 4.3 ns ซึ่งสามารถคำนวณค่าแบนด์วิดท์(-3 dB) ได้ประมาณ 85 MHz ซึ่งเพียงพอที่จะถ่ายโอนสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังอุปกรณ์วัด ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทองจะมีโอเวอร์ชูตเกิดขึ้นที่หน้าคลื่นของสัญญาณซึ่งเกิดจากค่าความเหนี่ยวนำทางภาคแรงต่ำไม่สัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำทางภาคแรงสูง ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อการวัดสัญญาณเล็กรั่วฟ้าผ่าเพราะสัญญาณเล็กรั่วฟ้าผ่าจะมีช่วงเวลาหน้าคลื่นที่ต่ำกว่ามาก

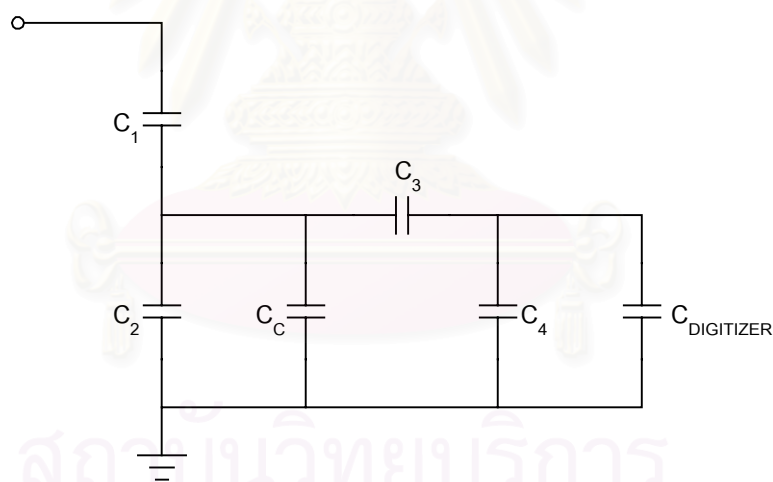
#### 4.1.5 การหาสเกลแฟกเตอร์

การหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดในที่นี่ใช้วิธีวัดอิมพีแดนซ์ โดยใช้ capacitance and dissipation factor measuring bridge ของ TETEX รุ่น 2805 วัดค่าเก็บประจุ ซึ่งใช้หลักการ ทำงานของ Transformer ratio arm bridge โดยค่าเก็บประจุที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเก็บประจุขององค์ประกอบในระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ

องค์ประกอบ	ตัวเก็บประจุ	แรงดันทดสอบ(kV)	ค่าเก็บประจุมาตรฐาน(pF)	ค่าเก็บประจุ(nF)
โวลเตจดีไวเดอร์	$C_1$	100	49.98	0.57046
	$C_2$	0.20	100.52	750.92
ตัวลดทอน	$C_3$	0.20	100.52	5.347
	$C_4$	0.05	100.52	896.15
เคเบิลวัด	$C_C$	0.20	100.52	8.1

จากค่าเก็บประจุในตารางที่ 4.3 สามารถนำมาหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดได้จากวงจร สมมูลในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรสมมูลในการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัด

จากวงจรสมมูล สามารถคำนวณสเกลแฟกเตอร์ได้ตามสมการ

$$F_C = \left( \frac{C_2 + C_C + C_B}{C_1} + 1 \right) \cdot \left( \frac{C_4 + C_{\text{DIGITIZER}}}{C_3} + 1 \right) \quad (4.1)$$

โดยที่ 
$$C_B = \frac{C_3 \cdot (C_4 + C_{\text{DIGITIZER}})}{C_3 + C_4 + C_{\text{DIGITIZER}}}$$

เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 4.3 จะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดเป็น

$$F_c = 1340.85 \cdot 168.60 = 226067.31$$

#### 4.1.6 การทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น(Short term stability)

เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบอัตราการลดทอนของโวลเตจดีไวเดอร์ก่อนและหลังการใช้งาน โดยอัตราการลดทอนจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1%

วงจรที่ใช้ทดสอบเป็นวงจรเดียวกับการทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ โดยก่อนการทดสอบจะต้องวัดอัตราการลดทอน จากนั้นทำการป้อนแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐานที่ค่ายอด 1000 kV จำนวน 15 ครั้งในแต่ละชั่วโมง และเมื่อทำการทดสอบเสร็จจะทำการวัดอัตราการลดทอนอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 4.4 อัตราการลดทอนก่อนและหลังการทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น

ครั้งที่	ก่อนทดสอบ		หลังทดสอบ	
	$V_i$ (V)	$V_o$ (mV)	$V_i$ (V)	$V_o$ (mV)
1	199.7	149.62	199.46	149.35
2	199.66	149.58	199.38	149.3
3	199.63	149.5	199.39	149.22
4	199.66	149.55	199.41	149.29
5	199.65	149.57	199.44	149.3
ค่าเฉลี่ย	199.66	149.564	199.416	149.292
	อัตราการลดทอน	1334.946912	อัตราการลดทอน	1335.744715

จากการทดสอบ อัตราการลดทอนก่อนการทดสอบ 1334.947  
อัตราการลดทอนหลังการทดสอบ 1335.754

จะเห็นว่าอัตราการลดทอนเพิ่มขึ้น 0.05972% จึงถือว่าผ่านการทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น

#### 4.1.7 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น(Linearity test)

การทดสอบนี้จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงการใช้งาน โดยจะทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง ถ้าค่าอัตราส่วนแรงดันจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดแรงดันเสิร์จมีค่าไม่เกิน 1 % ของค่าเฉลี่ย ระบบวัดแรงดันเสิร์จถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น

วงจรที่ใช้ทดสอบเป็นวงจรเดียวกับการทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดันอิมพัลส์ โดยทำการป้อนแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน ซึ่งในที่นี้ระบบวัดอ้างอิงจะเป็นระบบวัดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ โดยอ่านค่ายอด( $U_{peak}$ )จากเครื่องวัดค่ายอดแรงดัน แล้วนำมาเทียบหาอัตราส่วนกับแรงดันที่วัดได้จากระบบวัดแรงดันเสิร์จ( $U_{sys}$ ) ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

แรงดันทดสอบ	ครั้งที่	$U_{peak}$ (kV)	$U_{sys}$ (V)	$U_o/U_p$
200 kV	1	205.9	0.91087	226047.62
	2	205.9	0.91087	226047.62
	3	206.3	0.91087	226486.76
	ค่าเฉลี่ย	206.033	0.91087	226193.63
400 kV	1	400.1	1.77453	225468.15
	2	400.1	1.77453	225468.15
	3	400.1	1.77453	225468.15
	ค่าเฉลี่ย	400.1	1.77453	225468.15
600 kV	1	602.1	2.65697	226611.51
	2	601.6	2.65697	226423.33
	3	601.6	2.65697	226423.33
	ค่าเฉลี่ย	601.766	2.65697	226485.80
800 kv	1	807.9	3.56209	226805.04
	2	798.9	3.52941	226355.11
	3	798.9	3.52941	226355.11
	ค่าเฉลี่ย	801.9	3.5403	226506.22
1000 kV	1	1004	4.43209	226529.69
	2	1004	4.43209	226529.69
	3	1004	4.43209	226529.69
	ค่าเฉลี่ย	1004	4.43209	226529.69

ตารางที่ 4.6 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

แรงดันทดสอบ	ครั้งที่	$U_{peak}$ (kV)	$U_{sys}$ (Isr)	$U_o/U_p$
-200 kV	1	-204.6	-0.91087	224620.41
	2	-200.7	-0.88889	225787.21
	3	-205.4	-0.90843	226104.37
	ค่าเฉลี่ย	-203.566	-0.90273	225500.42
-400 kV	1	-401.4	-1.77303	226392.10
	2	-401.4	-1.77303	226392.10
	3	-401.4	-1.77547	226080.98
	ค่าเฉลี่ย	-401.4	-1.77384	226288.72
-600 kV	1	-599.9	-2.66059	225476.30
	2	-607.7	-2.68547	226291.85
	3	-607.2	-2.68547	226105.67
	ค่าเฉลี่ย	-604.933	-2.67717	225959.87
-800 kV	1	-802.8	-3.55547	225792.93
	2	-802.3	-3.55547	225652.30
	3	-803.6	-3.55547	226017.93
	ค่าเฉลี่ย	-802.9	-3.55547	225821.05
-1000 kV	1	-1005	-4.43303	226707.24
	2	-1001	-4.41814	226565.93
	3	-1008	-4.44838	226599.34
	ค่าเฉลี่ย	-1004.666	-4.43318	226624.22

จากการทดสอบ อัตราส่วนแรงดันจากระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดมีค่าไม่เกิน 1 % ของค่าเฉลี่ย จึงถือได้ว่าระบบวัดมีความเป็นเชิงเส้น

#### 4.2 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ

ในการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จจะทำการป้อนสัญญาณแรงดันรูปแบบต่างๆเข้าไปยังอินพุตของอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ เพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรส่วนต่างๆ โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนคือ



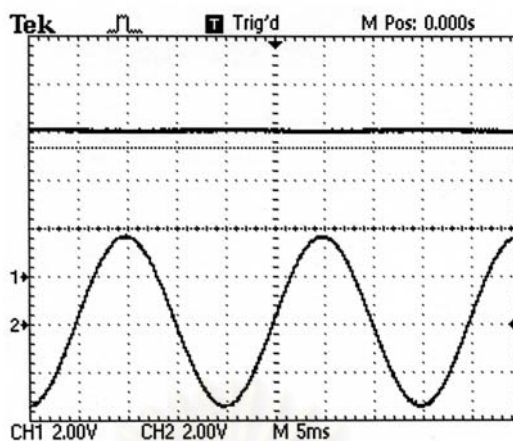
1) การทดสอบการทำงานของวงจรรองความถี่สูงผ่าน ทำการทดสอบโดยป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ต่างๆที่มีค่ายอดเท่ากัน(ประมาณ  $10.8 V_{peak}$ ) โดยจะวัดสัญญาณจากขาเอาต์พุตของวงจรรองเพื่อตรวจสอบอัตราการลดทอนเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบอัตราลดทอนของวงจรรองความถี่สูงผ่าน

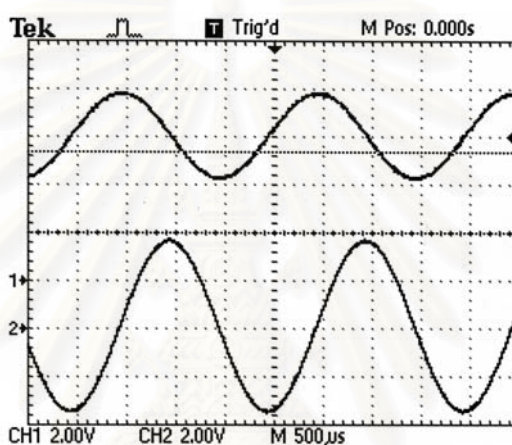
ความถี่ (Hz)	อัตราการลดทอนจากการคำนวณ	ช่องสัญญาณ 1		ช่องสัญญาณ 2		ช่องสัญญาณ 3	
		สัญญาณที่วัดได้	อัตราการลดทอน	สัญญาณที่วัดได้	อัตราการลดทอน	สัญญาณที่วัดได้	อัตราการลดทอน
50	0.00988	0.12	0.0111	0.12	0.0111	0.12	0.0111
100	0.03817	0.42	0.0389	0.41	0.0379	0.43	0.0398
250	0.19374	2.12	0.1963	2.08	0.1926	2.18	0.2018
500	0.47619	5.08	0.4704	5.00	0.4629	5.12	0.4741
1 k	0.77498	8.08	0.7481	8.08	0.7481	8.09	0.7491
2.5 k	0.95433	9.68	0.8963	9.68	0.8963	9.68	0.8963
5 k	0.98811	10.0	0.9259	10.0	0.9259	10.0	0.9259
10 k	0.99700	10.4	0.9629	10.4	0.9629	10.4	0.9629
25 k	0.99952	10.6	0.9815	10.5	0.9722	10.5	0.9722
50 k	0.99988	10.7	0.9907	10.6	0.9815	10.6	0.9815
100 k	0.99997	10.8	1.0000	10.8	1.0000	10.8	1.0000

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จที่ทำกรประกอบสร้างขึ้นมีทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ ดังนั้นในการทดสอบจะทำการทดสอบทั้ง 3 ช่องสัญญาณ ได้ผลทดสอบดังตารางที่ 4.7 จากผลทดสอบจะเห็นว่าวงจรรองความถี่สูงผ่านสามารถทำงานได้ดีตามที่ต้องการ โดยอัตราการลดทอนของสัญญาณความถี่ระบบจะอยู่ที่ 0.0111 และจะมีผลน้อยมากต่อสัญญาณที่มีความถี่มากกว่า 2.5 kHz

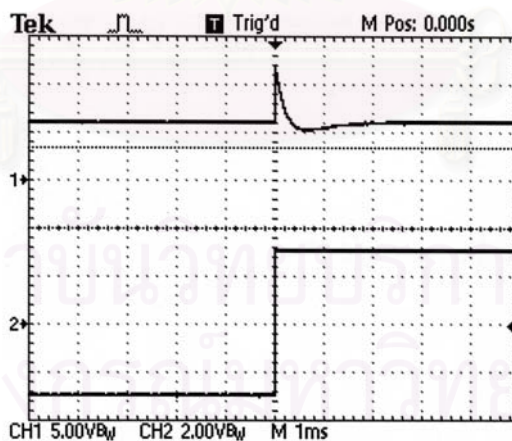
2) การทดสอบเพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรในส่วนต่างๆ จะทำการทดสอบโดยป้อนสัญญาณไซน์ 50 Hz, 500 Hz และสัญญาณสแควร์ 1 Hz ที่ขาอินพุต แล้วตรวจสอบรูปคลื่นที่ได้จากการทำงานของวงจรในส่วนต่างๆ



ก) สัญญาณไซน์ 50 Hz



ข) สัญญาณไซน์ 500 Hz



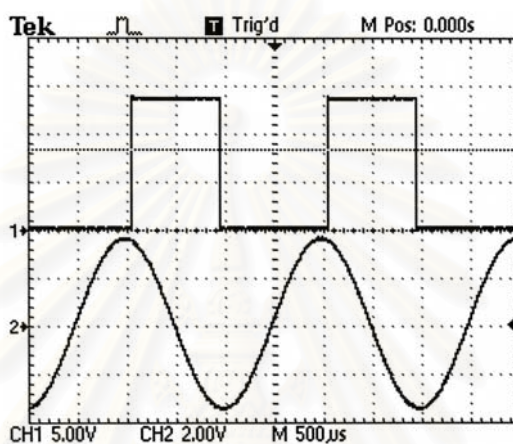
ค) สัญญาณสแควร์ 1 Hz

รูปที่ 4.13 สัญญาณที่ได้จากวงจรรองความถี่สูงผ่าน

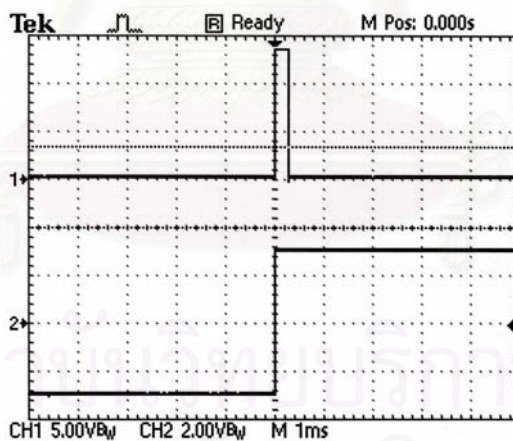
รูปที่ 4.13 เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณที่ได้จากวงจรรองความถี่สูงผ่านกับสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้า สัญญาณจากวงจรรองความถี่สูงผ่านจะมีการยกระดับแรงดัน

ขึ้นประมาณ 6 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าระดับที่ได้ออกแบบไว้ แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ เพราะอุปกรณ์เปรียบเทียบกับสัญญาณเองก็ใช้ระดับแรงดันนี้เป็นค่ากึ่งกลางด้วย

สัญญาณที่ออกจากวงจรรองความถี่สูงผ่านจะได้รับการลดทอนตามอัตราในตารางที่ 4.7 และมีการเลื่อนเฟสของสัญญาณ โดยในกรณีของสัญญาณสแควร์ 1 Hz ซึ่งประกอบจากสัญญาณไซน์ที่ความถี่ต่างๆ สัญญาณไซน์ความถี่ต่ำจะได้รับการกรองออกไปเหลือเพียงรูปคลื่นที่ประกอบจากไซน์ความถี่สูงดังรูปที่ 4.13ค)



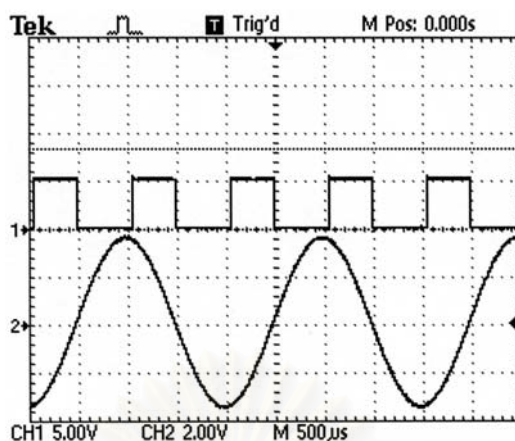
ก) สัญญาณไซน์ 500 Hz



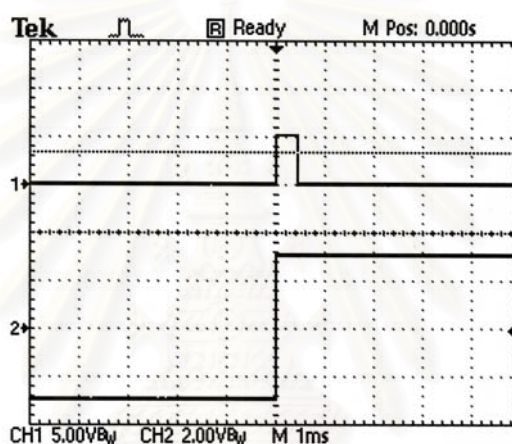
ข) สัญญาณสแควร์ 1 Hz

รูปที่ 4.14 สัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

รูปที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ สัญญาณพัลส์จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะมีระดับแรงดันประมาณ 13.5 โวลต์ และมีช่วงเวลากการเกิดขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่สัญญาณจากวงจรรองความถี่สูงผ่านมีค่าเกินกว่าระดับแรงดันที่ตั้งไว้ ( $V_{REF}$ )



ก) สัญญาณไซน์ 500 Hz



ข) สัญญาณสแควร์ 1 Hz

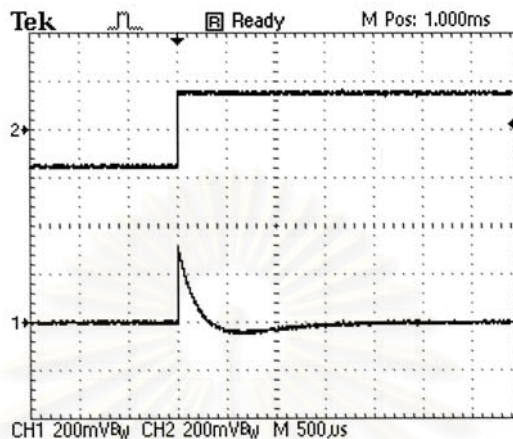
รูปที่ 4.15 สัญญาณที่ได้จากวงจร Monostable

รูปที่ 4.15 เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับสัญญาณที่ได้จากวงจร Monostable สัญญาณพัลส์จากวงจร Monostable จะมีระดับแรงดันประมาณ 5 โวลต์และมีช่วงเวลาการเกิดที่คงที่ประมาณ 500  $\mu$ s ซึ่งในกรณีของสัญญาณไซน์จะมีการเลื่อนเฟสของสัญญาณเนื่องจากวงจรของความถี่สูงผ่าน แต่จะไม่ส่งผลต่อการจับสัญญาณเลิร์จเพราะสัญญาณเลิร์จมีลักษณะการเกิดคล้ายกับสัญญาณสแควร์ ซึ่งจะไม่มีการเลื่อนเฟส

3) การทดสอบเพื่อหาระดับสัญญาณเลิร์จที่ต่ำที่สุดที่อุปกรณ์สามารถสร้างสัญญาณสั่งงานได้ ทำการทดสอบโดยป้อนสัญญาณสแควร์ 1 Hz ที่ขาอินพุต แล้วปรับระดับแรงดันที่ค่าต่างๆ จนกว่าจะได้ค่าที่ต่ำที่สุดที่วงจร Monostable เริ่มทำงาน

จากการทดสอบระดับแรงดันต่ำสุดของสัญญาณสแควร์ 1 Hz ที่ทำให้อุปกรณ์เริ่มสร้างสัญญาณสั่งงาน คือ 160 มิลลิโวลต์ เมื่อทำการวัดสัญญาณจากวงจรของความถี่สูงผ่านโดยตัด

ผลของแรงดันกระแสตรงที่ยกระดับสัญญาณขึ้นไป แสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งจะได้ว่าสัญญาณเล็รจที่ต่ำที่สุดที่ทำให้อุปกรณ์เริ่มสร้างสัญญาณสังงาน คือ 320 มิลลิโวลต์ หรือประมาณ 72.5 กิโลโวลต์ ทางด้านแรงสูง

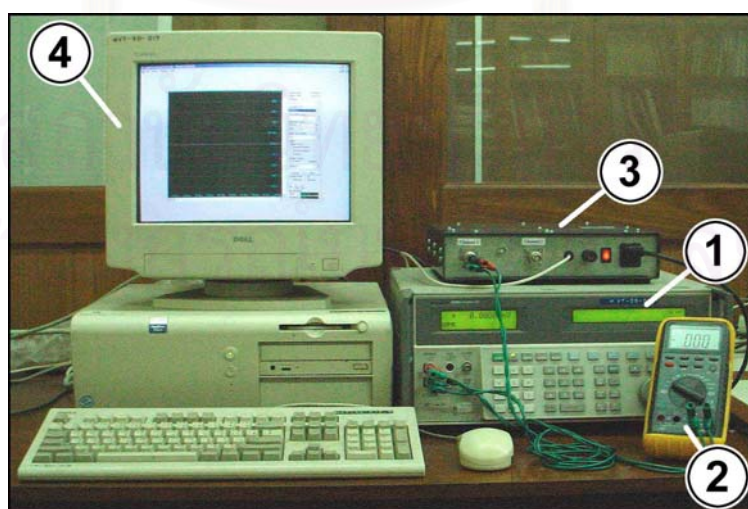


รูปที่ 4.16 สัญญาณเล็รจที่ต่ำที่สุดที่ทำให้อุปกรณ์เริ่มทำงาน

#### 4.3 การทดสอบเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์

การทดสอบเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการวัดรูปคลื่นโดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) การทดสอบความแม่นยำเชิงแอมพลิจูด ทำการทดสอบโดยการป้อนสัญญาณแรงดันกระแสตรงที่ระดับแรงดันต่างๆให้กับเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ แล้วทำการวัดสัญญาณเพื่อหาความคลาดเคลื่อน ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การทดสอบความแม่นยำเชิงแอมพลิจูดของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

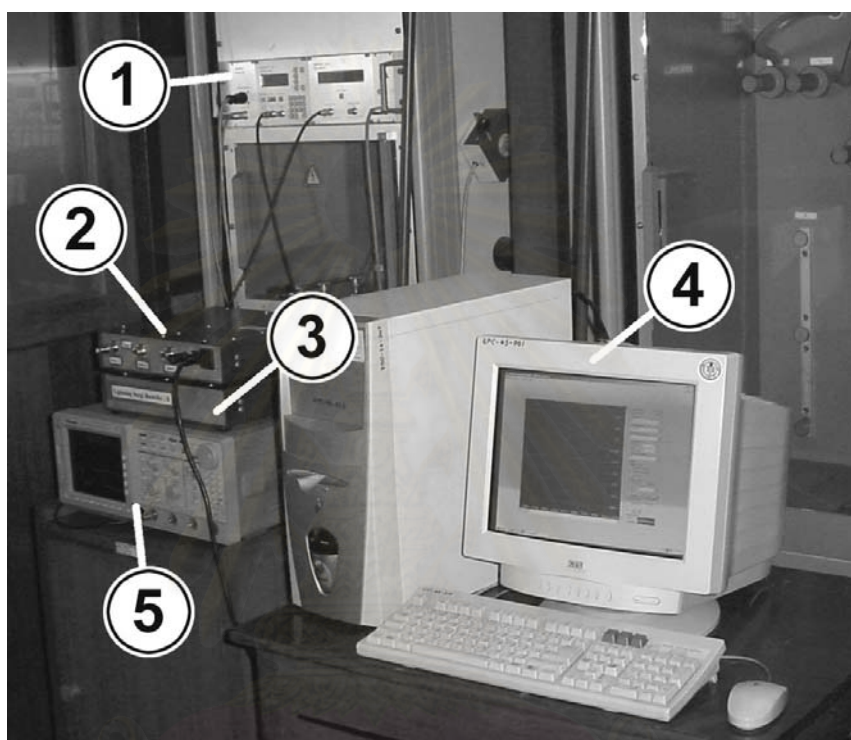
- 1) อุปกรณ์ปรับเทียบ 'FLUKE' Calibrator รุ่น 5500A
- 2) มัลติมิเตอร์ วัดระดับแรงดันที่ออกจากอุปกรณ์ปรับเทียบ
- 3) เครื่องวัดและบันทึกที่รูปคลื่นอิมพัลส์
- 4) คอมพิวเตอร์ที่ใช้แสดงผลและบันทึกข้อมูล

ตารางที่ 4.8 การทดสอบความแม่นยำเชิงแอมพลิจูดของเครื่องวัดและบันทึกที่รูปคลื่นอิมพัลส์

แรงดัน ที่ป้อน	แรงดันที่วัดได้										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
4.5	4.54	4.54	4.54	4.54	4.54	4.54	4.54	4.54	4.54	4.54	4.54
4	4.03	4.04	4.03	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.03	4.04	4.037
3.5	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53
3	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03
2.5	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53
2	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
1.5	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
1	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
0.5	0.507	0.507	0.507	0.507	0.507	0.507	0.505	0.507	0.505	0.507	0.5066
0	0.0024	0.0024	0.0024	0.0049	0.0049	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0029
-0.5	-0.498	-0.5	-0.5	-0.498	-0.498	-0.5	-0.498	-0.498	-0.498	-0.498	-0.499
-1	-1	-1.01	-1	-1.01	-1.01	-1	-1.01	-1	-1	-1.01	-1.005
-1.5	-1.51	-1.51	-1.51	-1.51	-1.51	-1.51	-1.5	-1.5	-1.51	-1.51	-1.508
-2	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01	-2.01
-2.5	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52
-3	-3.02	-3.02	-3.02	-3.03	-3.02	-3.02	-3.02	-3.02	-3.02	-3.02	-3.021
-3.5	-3.53	-3.53	-3.52	-3.53	-3.53	-3.53	-3.53	-3.52	-3.52	-3.53	-3.527
-4	-4.03	-4.02	-4.02	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	-4.028
-4.5	-4.53	-4.53	-4.53	-4.53	-4.53	-4.53	-4.53	-4.53	-4.53	-4.53	-4.53

จากการทดสอบจะได้ว่า ความคลาดเคลื่อนในการวัดแอมพลิจูดมีค่าไม่เกิน 1.4%

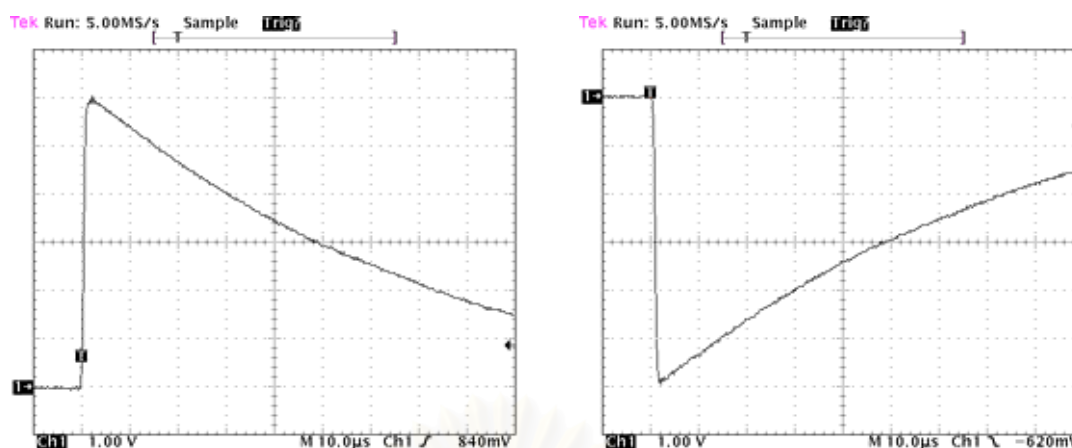
2) การทดสอบความแม่นยำเชิงเวลา ทำการทดสอบโดยการป้อนสัญญาณแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน  $1.2/50 \mu\text{s}$  ทั้งชั่วคราวและซ้ำบับ ซ้ำละ 10 ครั้ง ให้กับออสซิลโลสโคป และเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ (รูปที่ 4.18) จากนั้นทำการวัดหน้าคลื่นและหลังคลื่นของสัญญาณเพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำค่าเฉลี่ยของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์มาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของออสซิลโลสโคปเพื่อหาความคาดเคลื่อน



รูปที่ 4.18 การทดสอบความแม่นยำเชิงเวลาของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

- 1) อุปกรณ์สร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน  $1.2/50 \mu\text{s}$  (PSurge 3)
- 2) เครื่องตรวจจับเสิร์จ
- 3) เครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์
- 4) คอมพิวเตอร์ที่ใช้แสดงผลและบันทึกข้อมูล
- 5) ออสซิลโลสโคป



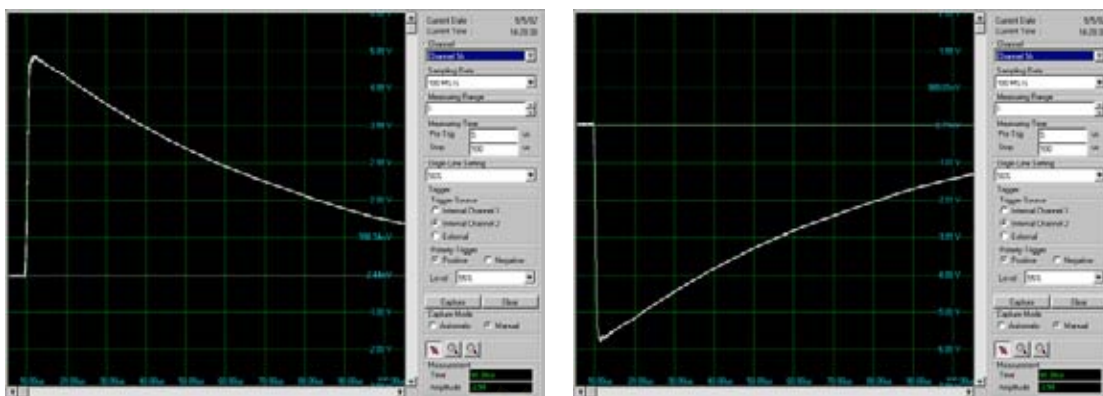
ก)

ข)

รูปที่ 4.19 รูปคลื่นนิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  ที่วัดโดยออสซิลโลสโคปตารางที่ 4.9 รูปคลื่นนิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  ที่วัดโดยออสซิลโลสโคป

ครั้งที่	ออสซิลโลสโคป					
	ขึ้นบวก			ขึ้นลบ		
	ค่ายอด	หน้าคลื่น( $\mu\text{s}$ )	หลังคลื่น( $\mu\text{s}$ )	ค่ายอด	หน้าคลื่น( $\mu\text{s}$ )	หลังคลื่น( $\mu\text{s}$ )
1	5.98	0.77	49.4	5.86	0.81	48.4
2	5.98	0.78	50.2	5.94	0.79	48.6
3	5.94	0.77	50.8	5.90	0.81	48.6
4	5.98	0.92	50.2	5.86	0.79	48.6
5	5.94	0.78	50.8	5.86	0.80	48.4
6	5.98	0.90	49.4	5.90	0.79	48.6
7	5.94	0.86	50.2	5.94	0.79	48.4
8	5.94	0.79	50.8	5.90	0.79	48.6
9	5.98	0.79	50.8	5.86	0.81	48.6
10	5.94	0.81	50.8	5.86	0.79	48.6
เฉลี่ย	5.96	0.817	50.34	5.87	0.797	48.54





ก)

ข)

รูปที่ 4.20 รูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  ที่วัดโดยเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์

ตารางที่ 4.10 รูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu\text{s}$  ที่วัดโดยเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์

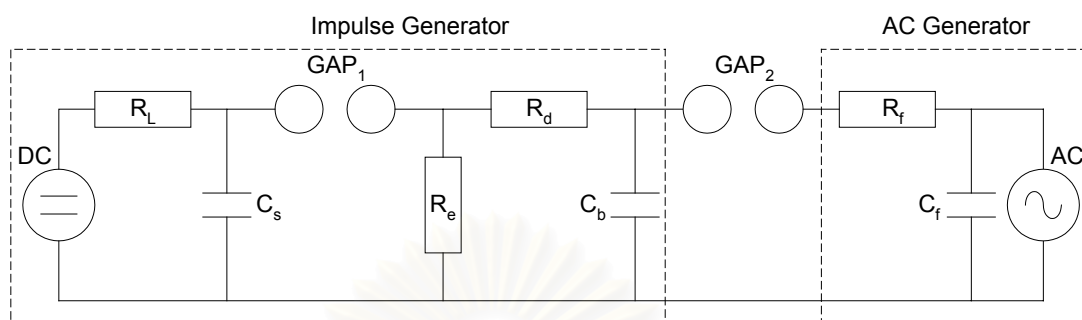
ครั้งที่	เครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์					
	ขาบวก			ขาลบ		
	ค่ายอด	หน้าคลื่น( $\mu\text{s}$ )	หลังคลื่น( $\mu\text{s}$ )	ค่ายอด	หน้าคลื่น( $\mu\text{s}$ )	หลังคลื่น( $\mu\text{s}$ )
1	5.82	0.84	50.36	5.75	0.78	49.78
2	5.82	0.82	50.42	5.76	0.78	49.7
3	5.82	0.84	50.39	5.72	0.80	50.14
4	5.81	0.84	50.34	5.76	0.78	49.74
5	5.82	0.84	50.38	5.72	0.80	50.22
6	5.81	0.82	50.4	5.75	0.78	49.8
7	5.82	0.82	50.43	5.76	0.78	49.72
8	5.82	0.82	50.38	5.73	0.78	50.16
9	5.82	0.82	50.34	5.72	0.80	50.2
10	5.84	0.82	50.41	5.75	0.80	49.78
เฉลี่ย	5.82	0.828	50.385	5.742	0.788	49.924

จากการทดสอบ ค่าความคาดเคลื่อนของช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์เมื่อเทียบกับออสซิลโลสโคปมีค่าไม่เกิน 2 %

#### 4.4 การจำลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า

การจำลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้าเป็นการจำลองสร้างสัญญาณเสิร์จให้ตกคร่อมสัญญาณความถี่ระบบ ณ มุมต่างๆของสัญญาณความถี่ระบบ เพื่อตรวจสอบการทำงานของ

อุปกรณ์วัดทางภาคแรงต่ำว่าสามารถตรวจจับและบันทึกสัญญาณเล็กร์จที่เข้ามายังระบบได้ตามที่ ออกแบบไว้ โดยวงจรสมมูลของการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 วงจรสมมูลการจำลองการเกิดเล็กร์จในระบบไฟฟ้า

วงจรจำลองการเกิดเล็กร์จในระบบไฟฟ้าประกอบด้วย

1) ชุดสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ประกอบด้วย

DC = แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์

$R_L$  = ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ ขนาด 200 k $\Omega$

$C_s$  = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ขนาด 50 nF

$GAP_1$  = แกปทรงกลม

$R_e$  = ความต้านปล่อยประจุ ขนาด 1.2 k $\Omega$

$R_d$  = ความต้านทานหน่วง ขนาด 210  $\Omega$

$C_b$  = ตัวเก็บประจุไหลด ขนาด 2 nF

2) ชุดสร้างแรงดันกระแสสลับ ประกอบด้วย

AC = แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

$R_f$  = ความต้านทานกรอง ขนาด 200 k $\Omega$

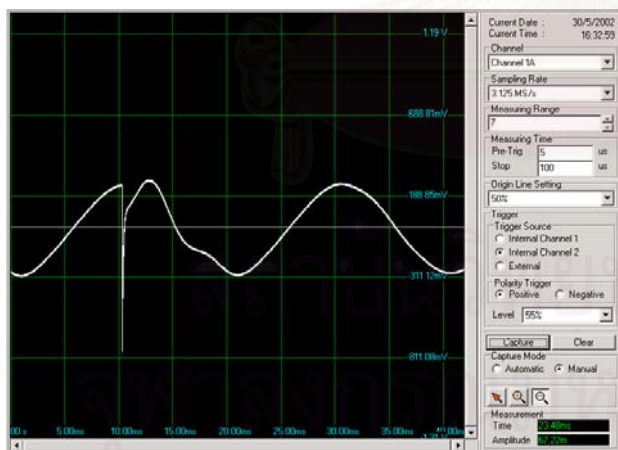
$C_f$  = ตัวเก็บประจุกรอง ขนาด 2 nF

ชุดสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่คร่อมตัวเก็บประจุไหลด หากขนาดของ สัญญาณที่ตกคร่อมแกปทรงกลม( $GAP_2$ )มากกว่าค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของ อากาศแกปทรงกลมก็จะทำงาน ทำให้สัญญาณอิมพัลส์ผ่านเข้าไปยังชุดสร้างแรงดันกระแสสลับ ความต้านทานกรองและตัวเก็บประจุกรองจะทำหน้าที่ลดทอนแรงดันอิมพัลส์เพื่อไม่ให้เกิดความ เสียหายต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ และในการวัดสัญญาณจะทำการต่อโวลเตจดีไวเดอร์ที่ปลาย แกปทรงกลม( $GAP_2$ )ทางฝั่งชุดสร้างแรงดันกระแสสลับ โดยวงจรทดลองแสดงดังรูปที่ 4.22

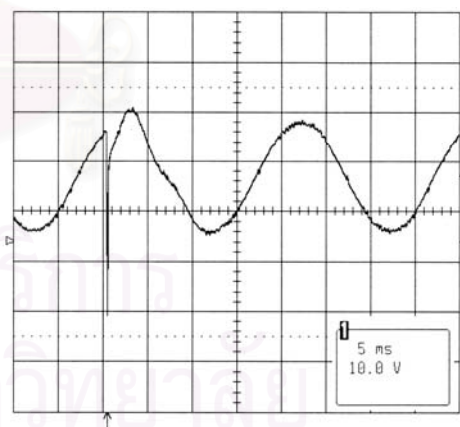


รูปที่ 4.22 วงจรทดลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า

ในการทดสอบจะทำการสร้างสัญญาณเสิร์จเข้าไป ณ มุมต่างๆของสัญญาณความถี่ระบบ โดยสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ค่ายอดประมาณ 35 kV ในขณะที่ชุดสร้างแรงดันกระแสลับจะสร้างแรงดันกระแสลับที่มีค่ายอดประมาณ 12 kV จากการทดสอบ ระบบวัดสามารถตรวจจับและบันทึกรูปคลื่นเสิร์จได้ในทุกกรณี(ภาคผนวก ก) โดยตัวอย่างรูปคลื่นที่ได้จากระบบวัดแสดงดังรูปที่ 4.23



ก) จากระบบวัด

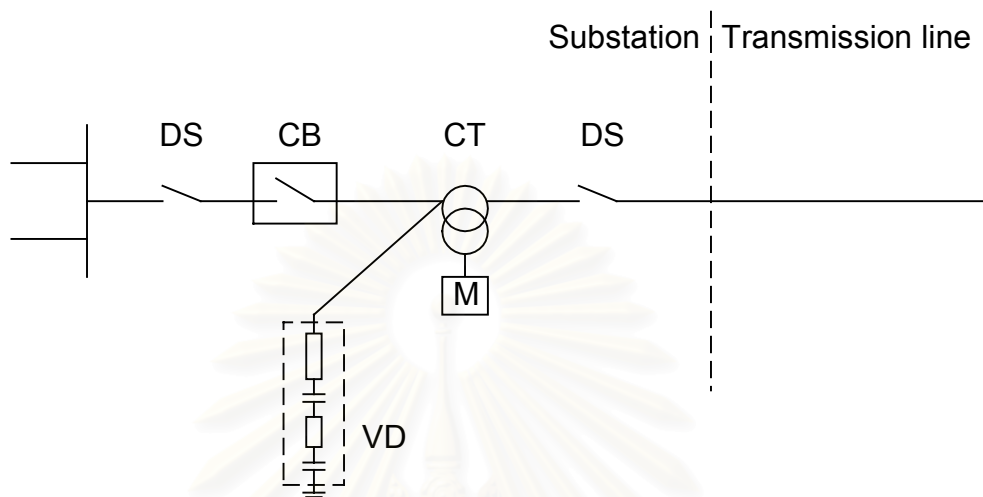


ข) จากออสซิลโลสโคป LeCroy 9384M

รูปที่ 4.23 รูปคลื่นเสิร์จที่บันทึกได้จากการจำลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า

#### 4.5 การติดตั้งระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า

ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่ทำการประกอบสร้าง ได้รับการติดตั้ง ณ สถานีไฟฟ้าย่อยบางพลี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ โดยได้รับการติดตั้งเข้ากับระบบสายส่งช่วง บางพลี-อ่อนนุช ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25



รูปที่ 4.24 ไดอะแกรมตำแหน่งการติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์

รูปที่ 4.24 แสดงไดอะแกรมตำแหน่งการติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์ โดยประกอบด้วย

- 1) เซอร์คิตเบรกเกอร์ : CB
- 2) หม้อแปลงวัดกระแส : CT
- 3) สวิตช์ตัดตอนวงจร : DS
- 4) โวลเตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้าง : VD



รูปที่ 4.25 โวลเตจดีไวเดอร์ที่ติดตั้งในระบบสายส่ง 230 kV

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่ออกแบบสร้าง ได้รับการออกแบบให้สามารถตรวจจับ แสดง และบันทึก ข้อมูลเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า 230 kV และผ่านการทดสอบตามมาตรฐานได้ตามที่กำหนดซึ่งพอสรุปได้คือ

##### 5.1.1 ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่า

ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าประกอบด้วย โวลต์เตจดีไวเดอร์ เคเบิลวัด ตัวลวดทอง อุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ และอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น โดยอุปกรณ์แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1) โวลต์เตจดีไวเดอร์ เลือกใช้โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่มีความต้านทานหน่วง ได้รับการบรรจุภายในกระบอกท่อพอร์ซเลน โดยใช้ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นฉนวนภายในแทนอากาศ มีอัตราลวดทองประมาณ 1318 เท่า

ภาคแรงสูง	
ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง(C <sub>1</sub> )	570 pF
ความต้านทานภาคแรงสูง(R <sub>1</sub> )	1044 Ω

ภาคแรงต่ำ	
ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ(C <sub>2</sub> )	751 nF
ความต้านทานภาคแรงต่ำ(R <sub>2</sub> )	0.7215 Ω
ความต้านทานแมทซิง	75 Ω

2) เคเบิลวัด เลือกใช้สายโคแอกเชียลเคเบิลนำสัญญาณจากโวลต์เตจดีไวเดอร์ไปยังตัวลวดทอง ในที่นี้เลือกใช้สาย RG11/U ความยาว 150 เมตร มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 75 Ω และค่าความเก็บประจุ 8.1 nF

3) ตัวลวดทอง เลือกใช้ตัวลวดทองที่มีอัตราลวดทองประมาณ 160 เท่า มีค่าขององค์ประกอบดังนี้

ตัวลดทอน	
ตัวเก็บประจุ $C_3$	5.35 pF
ความต้านทาน $R_3$	4.1 k $\Omega$
ตัวเก็บประจุ $C_4$	896 nF
ความต้านทาน $R_4$	25 $\Omega$

4) อุปกรณ์ตรวจจับเสิร์จ ใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านความถี่ตัด 835 Hz กรองสัญญาณความถี่ระบบออก

5) อุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น เลือกใช้เครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน คุณสมบัติดังนี้

จำนวนช่องสัญญาณ(Channel)	2 ช่องสัญญาณ
ระบบส่งผ่านข้อมูล	USB(12 Mbit/s)
ระบบปฏิบัติการ	Windows 2000

#### ภาคแอนะล็อก

แรงดันอินพุต	$\pm 10$ V(สูงสุด)
อินพุตอิมพีแดนซ์	100 k $\Omega$ // 20pF
เวลาขึ้น(Rise time)	< 8 ns
แบนด์วิดท์	48 MHz

#### ภาคดิจิทัล

อัตราซุ่มซักตัวอย่างสูงสุด	100 MS/s
ความละเอียดสูงสุด(กรณีวัดทั้งสัญญาณบวกและลบ)	11 bit
หน่วยความจำ	128 Kpoint

### 5.1.2 การทดสอบ

1) โวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 71 คือ ทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ที่ระดับแรงดัน 1,050 kV และผ่านการทดสอบความคงทนระยะสั้นความถี่ต่ำ ที่ระดับแรงดัน 325 kV<sub>r.m.s.</sub>

2) โวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างผ่านการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 358 จากการทดสอบที่ระดับแรงดัน 156 kV<sub>r.m.s.</sub> ไม่ปรากฏดีสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันดังกล่าว

3) ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่ออกแบบสร้างผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60-2 คือ การทดสอบผลตอบแทนรูปคลื่น ทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น ทดสอบความเป็นเชิงเส้น และหาสเกลแฟกเตอร์ ซึ่งระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าสามารถผ่านเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนด

4) ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่ออกแบบสร้างสามารถตรวจจับและบันทึกรูปคลื่นเสิร์จฟ้าผ่าได้ทั้งแบบ ผู้ใช้สั่งงาน และแบบอัตโนมัติ โดยข้อมูลแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าจะได้รับการจัดเก็บภายในฮาร์ดไดรฟ์ของเครื่องคอมพิวเตอร์

5) ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่ออกแบบสร้างสามารถตรวจจับและบันทึกรูปคลื่นเสิร์จที่จำลองขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ

6) ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่ออกแบบสร้าง ได้รับการติดตั้งเข้ากับระบบสายส่ง 230 kV ณ สถานีไฟฟ้าย่อยบางพลี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ โดยติดตั้งเข้ากับสายส่งช่วง บางพลี-อ่อนนุช

### 5.2 ปัญหาและข้อเสนอนะ

1) ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่ออกแบบสร้างเป็นระบบที่ใช้กับสายส่งเพียงเฟสเดียว หากจะนำไปใช้กับสายส่งทั้งสามเฟสจะต้องประกอบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ และอุปกรณ์บันทึกรูปคลื่นเพิ่มเติม

2) ระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่ออกแบบสร้างเป็นระบบที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับและบันทึกรูปคลื่นเสิร์จฟ้าผ่า การจะนำข้อมูลเสิร์จฟ้าผ่าไปใช้ในการออกแบบการประสานสัมพันธ์การฉนวนจำเป็นต้องนำรูปคลื่นเสิร์จฟ้าผ่าที่จับได้ไปวิเคราะห์เสียก่อน

3) การนำรูปคลื่นแรงดันเสิร์จฟ้าผ่ามาวิเคราะห์ ผู้ใช้จะต้องทำสำเนาข้อมูลจากฮาร์ดไดรฟ์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ หากระบบวัดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าได้รับการติดตั้ง ณ ที่ห่างไกลอาจสร้างความลำบากในการเดินทางให้กับผู้ใช้ ในกรณีนี้ผู้ใช้สามารถพัฒนาระบบเพิ่มเติม โดยการนำคุณสมบัติด้านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้งาน เพื่อให้สามารถทำสำเนาข้อมูลจากระยะไกลได้

## รายการอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด. **เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง.** เอกสารการฝึกอบรม ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กันยายน 2543.
- [2] IEC Publication No. 71. **Insulation Co-ordination.** International Electrotechnical Commission, 1976.
- [3] S. Okabe, M. Kan, T. Kouno. **Analysis of Surge Measured at 550 kV Substations.** IEEE Trans. Power Delivery, vol. 6, No. 4, p.1462, October 1991.
- [4] ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง. **การศึกษาวิจัยเรื่อง Transient Switching Surge ในระบบ 69 kV ของสถานีต้นทางลาดพร้าว ขณะปลด สวิตช์ตัดตอนสายส่งที่ไม่มีโหลด.** พฤษภาคม 2540.
- [5] ประเสริฐ รังสีโสภณอารมณ์. **การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539.
- [6] Ragaller K.. **Surges in High-Voltage Network.** Plemum Press, 1980.
- [7] IEC Publication No. 60-2. **High Voltage Test Techniques-Part 2 : Measuring System.** International Electrotechnical Commission,1994.
- [8] Kuffel E., Zaengl W.S. and Kuffel J.. **High Voltage Engineering Fundamental.** Butterworth-Heinemann, Oxford, 2<sup>nd</sup> ed., 2000.
- [9] สำรวย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- [10] Schwab A.J.. **High Voltage Measurement Techniques.** Cambridge, MIT Press, 1972.
- [11] HAEFELY Operating Instructions. **Mixed Capacitive and Ohmic Voltage Dividers Type RCR/RCZ**
- [12] IEC Publication No. 1083-1. **Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests – Part 1 : Requirements for digital recorders.** International Electrotechnical Commission,1991.



- [13] T.R. McComb, J. Kuffel, R. Malewski, K. Schon. **Qualifying an Impulse Digitizer for Measurements in HV Impulse Tests.** IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990.
- [14] ณรงค์ ทองฉิม, **เครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์สำหรับการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน.** รายงานผลการวิจัย ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษ เฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [15] Naidu M.S., Kamaraju V.. **High Voltage Engineering.** Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2<sup>nd</sup> ed., 1995.
- [16] Arthur B. Williams, Fred J. Taylor. **Electronic filter design handbook : LC active and digital filters.** McGraw-Hill, New York, 2<sup>nd</sup> ed., 1988.
- [17] Philips. **74HC/HCT221 Dual non-regriggerable monostable multivibrator with reset.** Philips Semiconductors, December 1990.
- [18] IEC Publication No. 358. **Coupling Capacitors and Capacitor Dividers.** International Electrotechnical Commission, 1971.

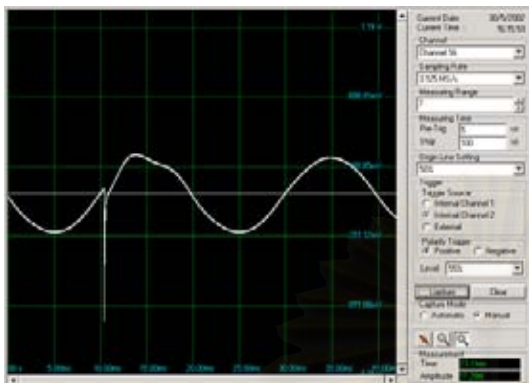


ภาคผนวก

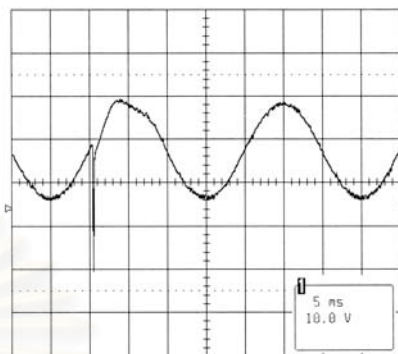
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

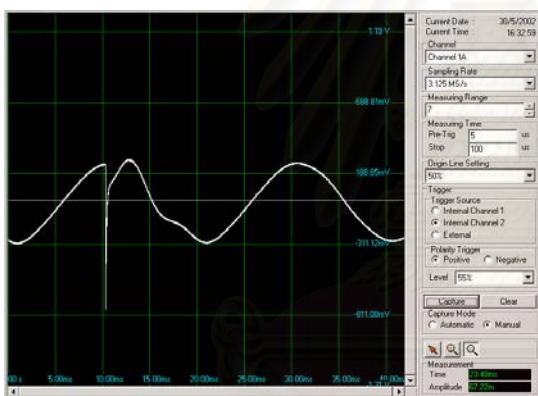
## รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า



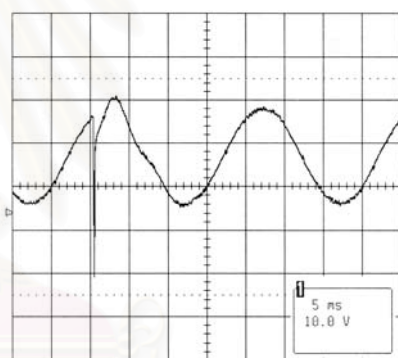
ก) จากระบบวัด



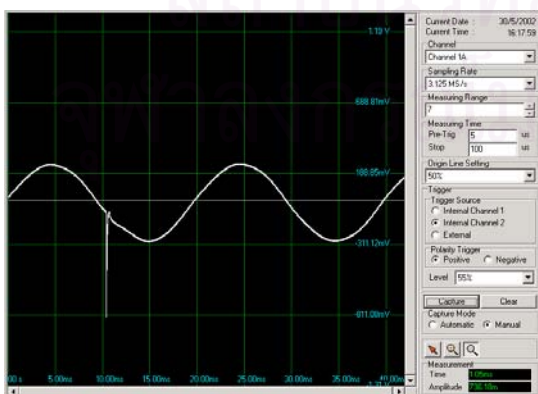
ข) จากออสซิลอสโคป

รูปที่ ก.1 แรงดันอิมพัลส์ลบตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม  $0^\circ$ 

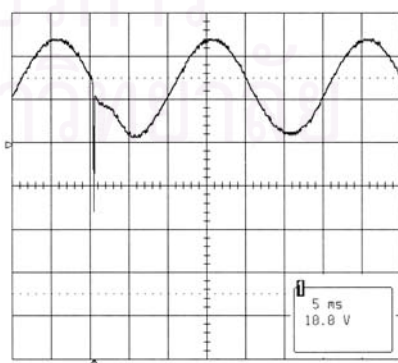
ก) จากระบบวัด



ข) จากออสซิลอสโคป

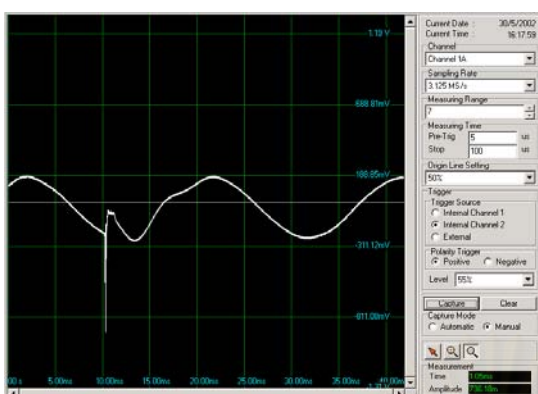
รูปที่ ก.2 แรงดันอิมพัลส์ลบตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม  $90^\circ$ 

ก) จากระบบวัด

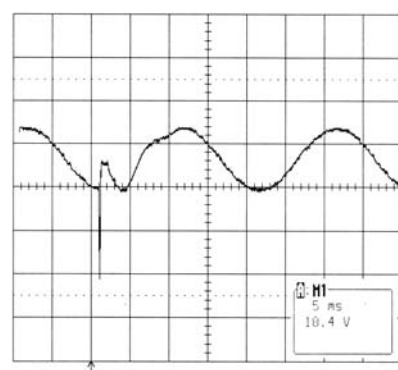


ข) จากออสซิลอสโคป

รูปที่ ก.3 แรงดันอิมพัลส์ลบตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม  $180^\circ$

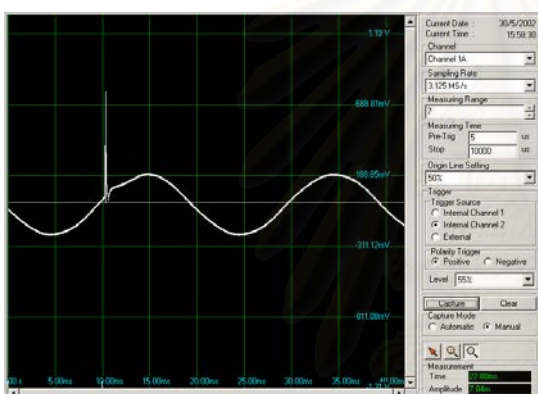


ก) จากระบบวัด

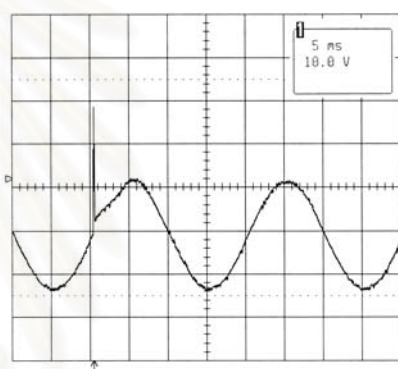


ข) จากออสซิลอสโคป

รูปที่ ก.4 แรงดันอิมพัลส์ลบตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม  $270^\circ$

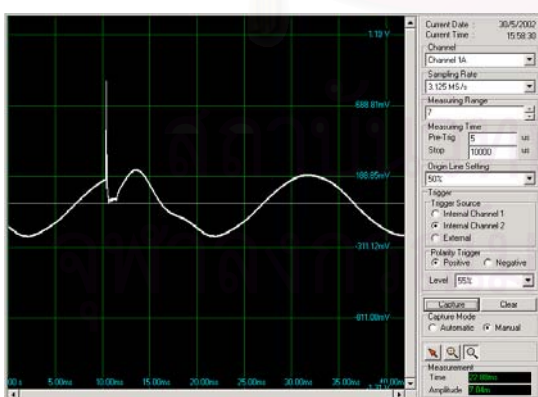


ก) จากระบบวัด

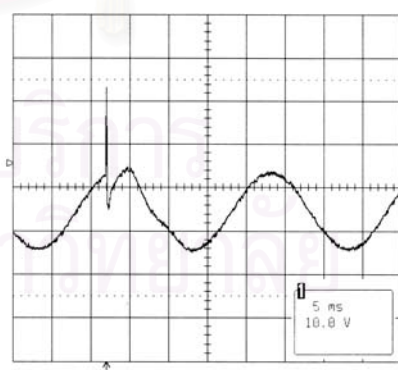


ข) จากออสซิลอสโคป

รูปที่ ก.5 แรงดันอิมพัลส์บวกตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม  $0^\circ$

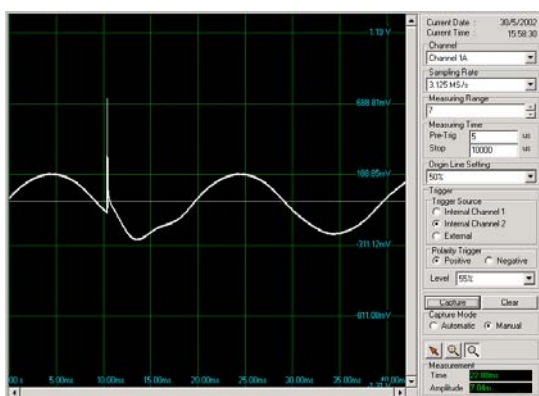


ก) จากระบบวัด

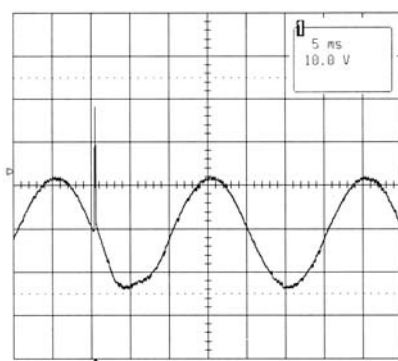


ข) จากออสซิลอสโคป

รูปที่ ก.6 แรงดันอิมพัลส์บวกตกคร่อมแรงดันกระแสลับ ณ มุม  $90^\circ$

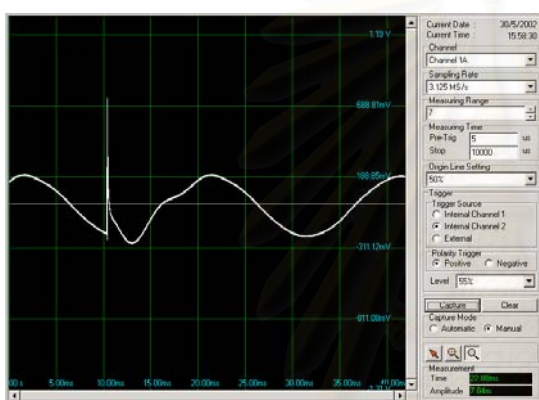


ก) จากระบบวัด

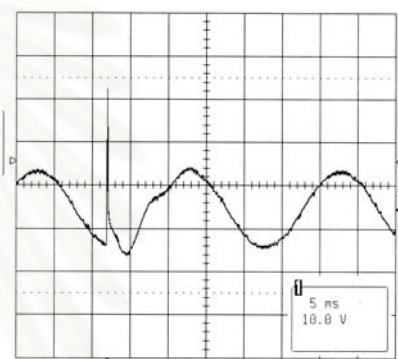


ข) จากออสซิลอสโคป

รูปที่ ก.7 แรงดันอิมพัลส์บวกตกคร่อมแรงดันกระแสสลับ ณ มุม  $180^\circ$



ก) จากระบบวัด



ข) จากออสซิลอสโคป

รูปที่ ก.8 แรงดันอิมพัลส์บวกตกคร่อมแรงดันกระแสสลับ ณ มุม  $270^\circ$

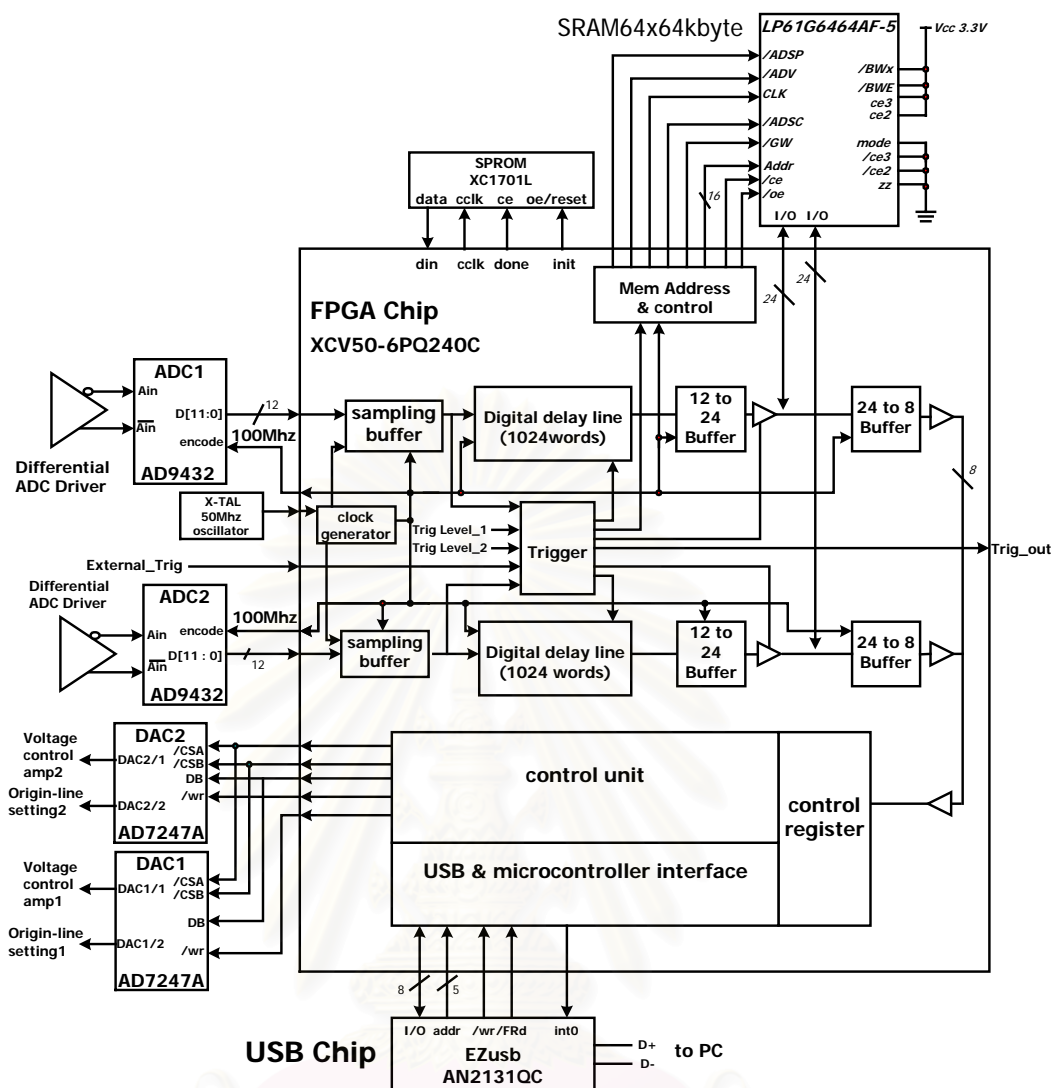
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### วงจรมาดิจิตอลของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์[14]

วงจรมาดิจิตอลของเครื่องวัดและบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์เกือบทั้งหมดได้รับการออกแบบเป็นแบบวงจรรวมภายในชิป FPGA (Field Programmable Gate Array) ยกเว้น ADC, DAC, หน่วยความจำ(SRAM), SPROM, Oscillator, พอร์ต USB และ อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดของวงจรมาดิจิตอลทั้งหมดแสดงดังรูปที่ ข.1 และรูปที่ ข.2 วงจรมาดิจิตอลส่วนที่ออกแบบไว้ในชิป FPGA จะออกแบบวงจรมาดิจิตอลในระดับ RTL (Register Transfer Level) แล้วทำการเขียนด้วยภาษา VHDL (Very High Speed Hardware Description Language) และสังเคราะห์เป็นวงจรมาดิจิตอลระดับ Gate จากนั้นจึงนำไปผ่านการ Place & Route เพื่อนำไปคอนฟิก(Config)ลงบน FPGA เบอร์ XCV50-6PC240 ซึ่งเป็น FPGA ของบริษัท Xilinx วงจรมาดิจิตอลนอกจากจะมี CLBs (Configuration Blocks) สำหรับคอนฟิกให้เป็นวงจรมาดิจิตอลรูปแบบต่างๆตามที่ต้องการ ยังมีวงจรมาดิจิตอล Lock Loop (DLL) ในการลด Skew ของสัญญาณนาฬิกา และคุณสมบัติที่ค่าต่างๆได้ วงจรมาดิจิตอลที่ออกแบบจึงสามารถทำงานได้ที่ความถี่นาฬิกา 100 Mhz โดยใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอกขนาด 50 Mhz ผ่านวงจรมาดิจิตอล DLL เพื่อให้วงจรมาดิจิตอลภายในชิปทำงานที่ความถี่สูง แต่สัญญาณบน PCB มีความถี่ต่ำได้ วงจรมาดิจิตอลส่วนต่างๆภายในภาคดิจิตอลสามารถแยกรายละเอียดได้ดังนี้คือ

1) วงจรมาดิจิตอลภายในชิป FPGA ประกอบด้วยวงจรมาดิจิตอล USB & Microcontroller Interface (ทำหน้าที่ Interface ระหว่างวงจรมาดิจิตอลภายในชิป FPGA กับ ชิป USB เพื่อทำหน้าที่เป็นพอร์ต USB), วงจรมาดิจิตอล Control Unit (เป็นวงจรมาดิจิตอลที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเพื่อไปควบคุมวงจรมาดิจิตอลส่วนต่างๆโดยการตรวจสอบค่าที่อยู่ใน Control Register), วงจรมาดิจิตอล Control Register (เป็นลักษณะของ Memory Map ที่เก็บค่าพารามิเตอร์ที่รับคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์เพื่อให้วงจรมาดิจิตอลภายในชิป FPGA ทำงานตามที่ต้องการ), วงจรมาดิจิตอล Digital Delay Line (ทำหน้าที่หน่วงเวลาสัญญาณอิมพัลส์เพื่อให้สามารถมองเห็นและบันทึกสัญญาณก่อน Trig หรือ Pre-Trig ได้), วงจรมาดิจิตอล Samp-Buffer และวงจรมาดิจิตอล Clock Generator (ทำงานร่วมกันในการกำหนดอัตราซ้ำตัวอย่างของสัญญาณอิมพัลส์แบบต่างๆ), วงจรมาดิจิตอล Mem Address & Control (ทำหน้าที่สร้าง Address และสัญญาณเพื่อติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกหรือ SRAM 64x64 kB), วงจรมาดิจิตอล Trigger (ทำหน้าที่เปรียบเทียบขนาดของสัญญาณอิมพัลส์ที่เข้ามาที่ระดับที่ตั้งไว้หรือ Trig Level เมื่อสัญญาณอินพุตที่เข้ามา มีขนาดถึงค่าระดับที่ตั้งไว้ วงจรมาดิจิตอลส่วนนี้จะส่งสัญญาณส่งงานไปยังวงจรมาดิจิตอล Mem Address & Control เพื่อให้หน่วยความจำภายนอกเริ่มเก็บข้อมูล)

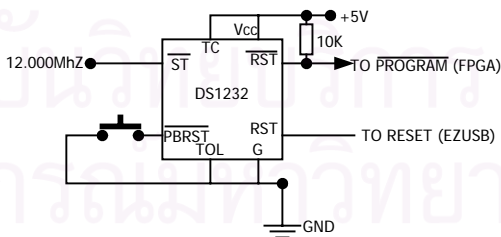
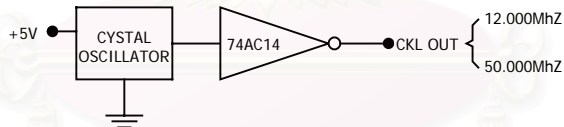
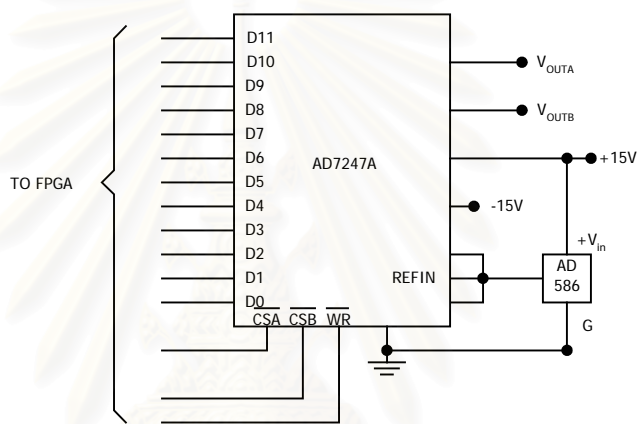
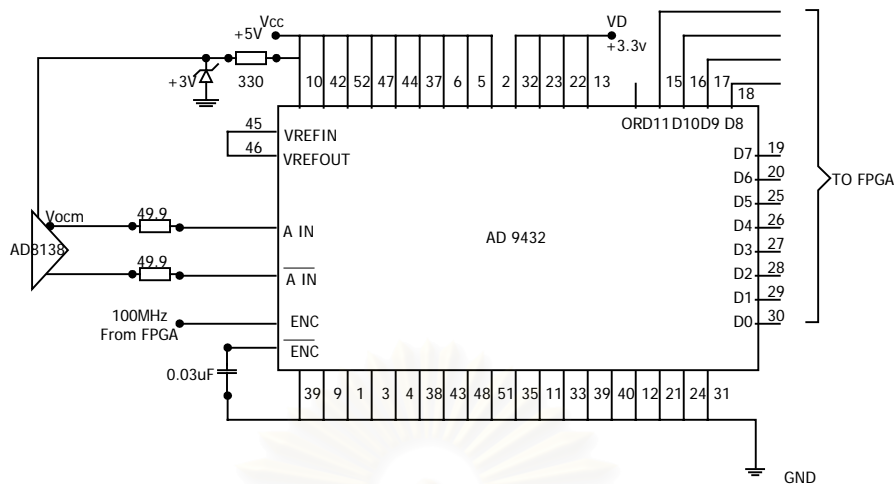


รูปที่ ข.1 วงจรภาคดิจิทัล

2) วงจร ADC1 และ ADC2 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่อัตราซีกตัวอย่างคงที่คือ 100 MS/s เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิที่ตัว ADC ให้เกือบคงที่เพื่อให้ค่าที่ ADC แปลงได้นั้นถูกต้องมากที่สุด เลือกใช้ไอซีเบอร์ AD9432 ที่มีความละเอียด 12 บิต ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดขั้นต่ำคือ 9 บิต

3) DAC1 และ DAC2 เป็นวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่มีความละเอียด 12 บิต เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันไปควบคุมอัตราขยายของวงจร VCA และวงจร Origin Line Setting โดยเลือกใช้ไอซีเบอร์ AD7247A ที่ประกอบด้วย DAC อยู่ภายใน 2 ชุด

4) หน่วยความจำ เป็นวงจรพักข้อมูลชั่วคราวก่อนส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์ โดยเลือกใช้ไอซีเบอร์ LP61G6464AF-5 ซึ่งเก็บข้อมูลสูงสุดได้ 128 kpoint(หรือ 256 kB) ต่อ 1 ช่องสัญญาณ และรับข้อมูลพร้อมกันทั้ง 2 ช่องสัญญาณ มาเก็บไว้ที่หน่วยความจำ



รูปที่ ข.2 รายละเอียดวงจรประกอบภายนอกของภาคดิจิทัล



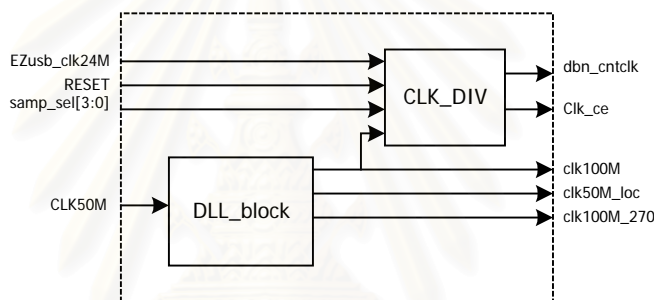
5) SPROM ทำหน้าที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับวงจรดิจิทัล โดยทำการ Download ลงไปใน FPGA เมื่อดิจิทัลเซเซอร์เริ่มทำงาน

6) พอร์ต USB ทำหน้าที่ติดต่อหรือเชื่อมต่อสัญญาณเพื่อรับส่งข้อมูลระหว่างดิจิทัลเซเซอร์กับโปรแกรมประยุกต์บนคอมพิวเตอร์ ในที่นี้จะใช้ไอซีเบอร์ AN2131QC หรือ EZusb โดยมี Microcontroller ตระกูล MCS51 เป็น Core อยู่ภายในเพื่อควบคุมการทำงานของพอร์ต USB

## รายละเอียดวงจรย่อยภาคดิจิทัลที่อยู่ในชิป FPGA

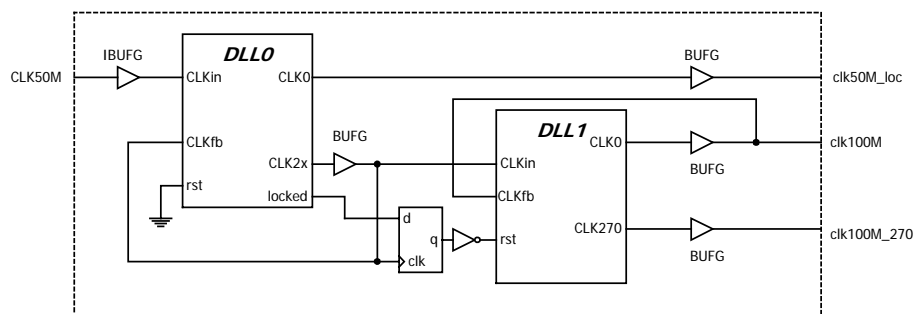
### 1. Clock generator

Clock generator ทำหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกาและสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ต่างๆ โดยรับสัญญาณนาฬิกา 50 MHz และ 24 MHz จากภายนอกเข้ามาเพื่อนำไปกำหนดอัตราชักตัว อย่างมีบล็อกไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ ข.3 ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ



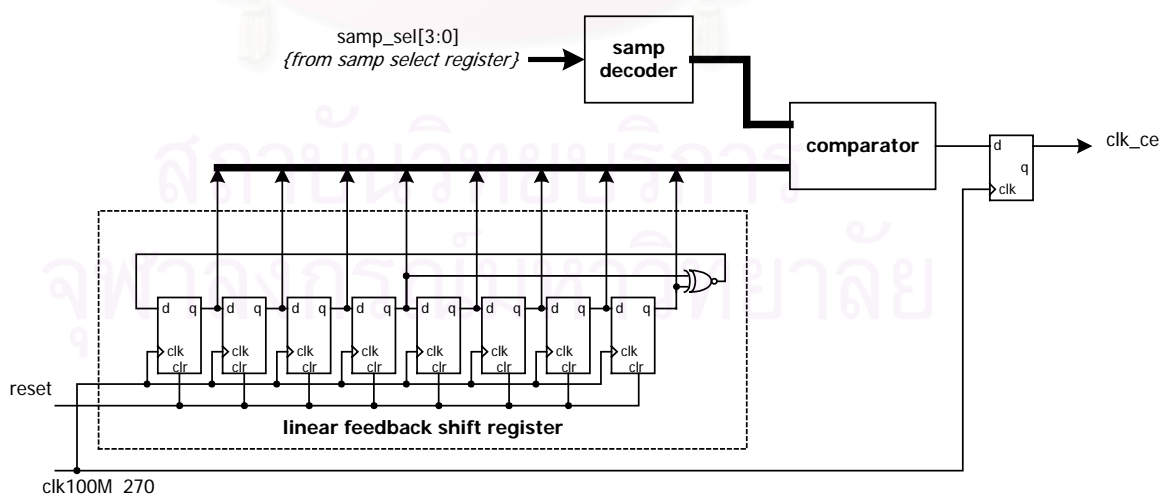
รูปที่ ข.3 บล็อกไดอะแกรมวงจร Clock generator

1) DLL\_block ส่วนนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกา 100Mhz สองสัญญาณ คือ CLK100M และ CLK100M\_270 ซึ่งมีเฟสต่างจากสัญญาณ CLK100M อยู่ 270 องศา โดยใช้สัญญาณ CLK100M เป็นสัญญาณ Encode ให้กับ ADC และใช้สัญญาณ CLK100M\_270 เป็นสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจรภาคดิจิทัล เพื่อชดเชยการหน่วงเวลาของสัญญาณข้อมูลจากเอาต์พุตของ ADC มาที่ FPGA นอกจากนี้ได้ทำการนำเอาสัญญาณ CLK50M มาผ่านวงจร Delay Lock Loop(DLL) ภายใน FPGA เพื่อลด Skew Delay เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปทำหน้าที่เป็นสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจร Address Control ดังแสดงในรูปที่ ข.4 ในส่วนของ DLL\_block จะใช้วงจร Delay Lock Loop ซึ่งเป็นวงจรที่อยู่ใน FPGA ของ Xilinx ตระกูล Virtex ทำหน้าที่คูณความถี่จาก 50Mhz เป็น 100 Mhz ที่มูมเฟส 0 องศา และ 270 องศา นอกจากนี้ DLL ยังทำหน้าที่ลด clock skew ที่เกิดภายใน FPGA ทำให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงได้

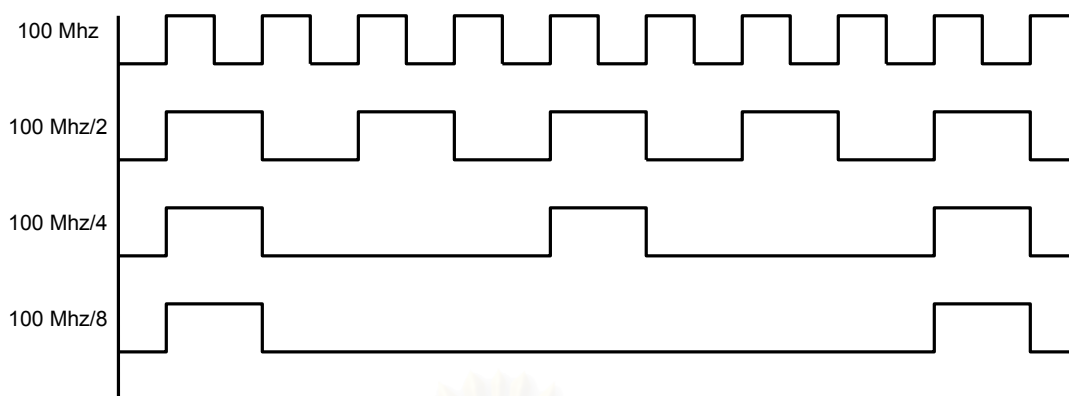


รูปที่ ๓.4 วงจร DLL block

2) CLK\_DIV ทำหน้าที่นำเอาสัญญาณ CLK100M\_270 มาหารเพื่อให้ได้ความถี่ต่างๆมาควบคุมอัตราซั๊กตัวอย่าง และการทำงานของวงจร โดยอัตราซั๊กตัวอย่างสามารถกำหนดโดยค่าในรีจิสเตอร์ Samp\_sel [14h] และมีหน้าที่สร้างสัญญาณ 500 kHz ให้กับวงจรแก้สัญญาณ Debounce โดยนำสัญญาณนาฬิกาขนาด 24 Mhz จาก EZusb มาหารความถี่ด้วย 48 เพื่อให้ได้ความถี่ 500 kHz วงจรหารความถี่ทั้งหมดจะใช้ Linear Feedback Shift Register (LFSR) ในการสร้าง Counter เพื่อลดขนาดวงจร และเพื่อเพิ่มความเร็วในการทำงาน เนื่องจากวงจร LFSR ที่ใช้นั้นออกแบบด้วย Shift Register และ XNOR เพียง 1 ตัวเท่านั้น จึงมี Delay ใน Combination Path น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ ๓.5 LFSR จะสร้างข้อมูลที่มีลำดับแน่นอน ทุกๆขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา หากข้อมูลเหล่านั้นตรงกับข้อมูลจาก Samp Decoder แล้วสัญญาณ clk\_ce แสดงดังรูปที่ ๓.6 จะเป็น '1' ตลอดช่วง '1' คาบของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งสัญญาณจาก Samp Decoder เป็นสัญญาณที่ Decode มาจากข้อมูลใน Samp Select Register [14h]



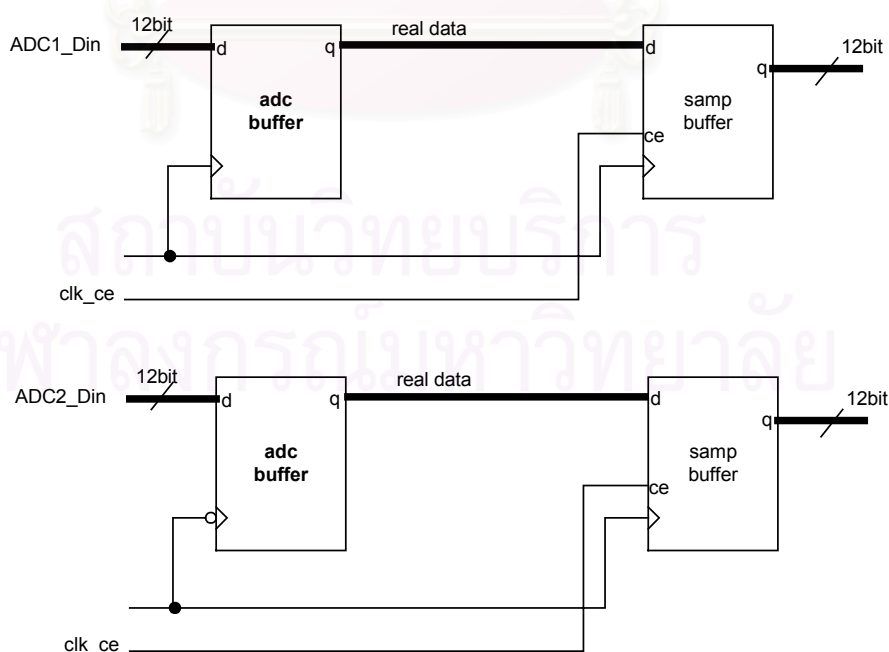
รูปที่ ๓.5 วงจร Clock Divider โดยใช้ Linear Feedback Shift Register



รูปที่ ข.6 ลักษณะสัญญาณ CE ( Clock Enable )

## 2. ADC Buffer และ Samp Buffer

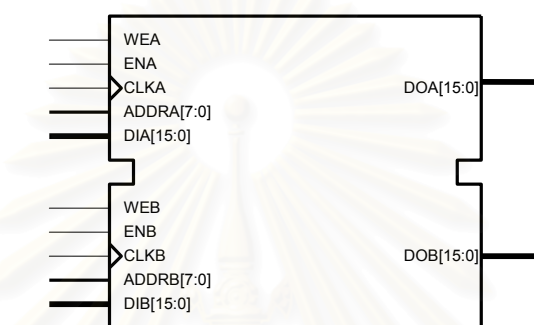
ADC Buffer และ Samp Buffer แสดงดังรูปที่ ข.7 ทำหน้าที่รับข้อมูลจาก ADC ซึ่งเป็นข้อมูลขนาด 12 บิต ที่ซักรับตัวอย่างด้วยอัตราซักรับตัวอย่างคงที่คือ 100 MS/s ในส่วน ADC Buffer นั้นจะประกอบจาก D Flip Flop ใน IOB ของ FPGA จำนวน 12 ตัว รับข้อมูลจาก ADC1 และ ADC2 ผ่าน I/O pin โดยช่องสัญญาณที่ 1 จะเก็บค่าที่ทุกๆขาขึ้นของสัญญาณ clk100M\_270 ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 จะรับค่าที่ขาลง เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านความเร็วของ ADC และลายวงจรบน PCB จาก ADC1 และ ADC2 มาที่ FPGA มีความยาวต่างกัน ส่วน samp buffer นั้นจะรับอินพุตจาก ADC Buffer และทำการส่งข้อมูลออกไปเมื่อสัญญาณ clk\_ce เท่ากับ '1' เท่านั้น Samp Buffer จึงมีหน้าที่เสมือนส่วนปรับอัตราซักรับตัวอย่างข้อมูลจาก ADC นั้นเอง



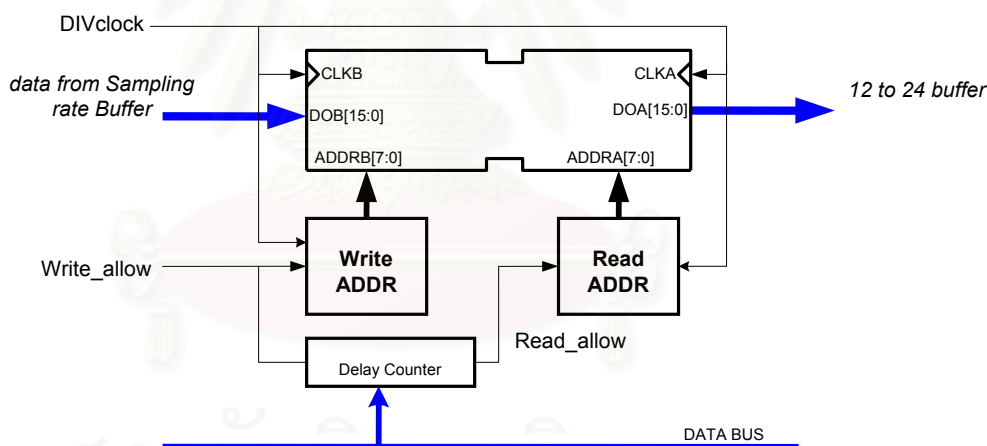
รูปที่ ข.7 วงจร ADC Buffer และปรับอัตราซักรับตัวอย่าง

### 3. วงจร Programmable Delay Line

วงจร Programmable Delay Line ทำหน้าที่ในการหน่วงเวลาข้อมูลก่อนนำเข้าไปเก็บไว้ในหน่วยความจำเพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลก่อนหน้าที่จะเกิดการ Trig (หรือ Pre-Trig) ได้จำนวนหนึ่ง โดยสามารถกำหนดช่วงเวลาในการหน่วงเวลาได้ วงจรที่ใช้ในการหน่วงเวลาของข้อมูลเป็น FIFO ขนาด 1024x12 บิต โดยสร้างจาก Dual-Read/Write Port Synchronous RAM ซึ่งแต่ละ พอร์ต สามารถ Read หรือ Write ได้อย่างอิสระ จึงสามารถนำมาสร้างเป็นหน่วยความจำแบบ FIFO ได้



รูปที่ ๓.8 Dual-port Block SelectRAM+ Memory



รูปที่ ๓.9 วงจร Programmable Delay Line โดยใช้ Block SelectRAM+

วงจรของ Programmable Delay Line ใช้ Block SelectRAM+ แสดงดังรูปที่ ๓.8 โดยใช้ Address ของการ Read และ Write แยกกันทำงานที่สัญญาณนาฬิกา 100 Mhz ทำงานร่วมกับสัญญาณ CE (Clock Enable) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้จากการหารความถี่ 100 MHz เพื่อให้สามารถทำงานได้ที่อัตราชักตัวอย่างต่างๆได้ วงจรส่วน Write Address และ Read Address จะมีช่องสัญญาณ Write\_allow และ Read\_allow ที่ทำหน้าที่อนุญาตในการเขียนและอ่านข้อมูล โดย

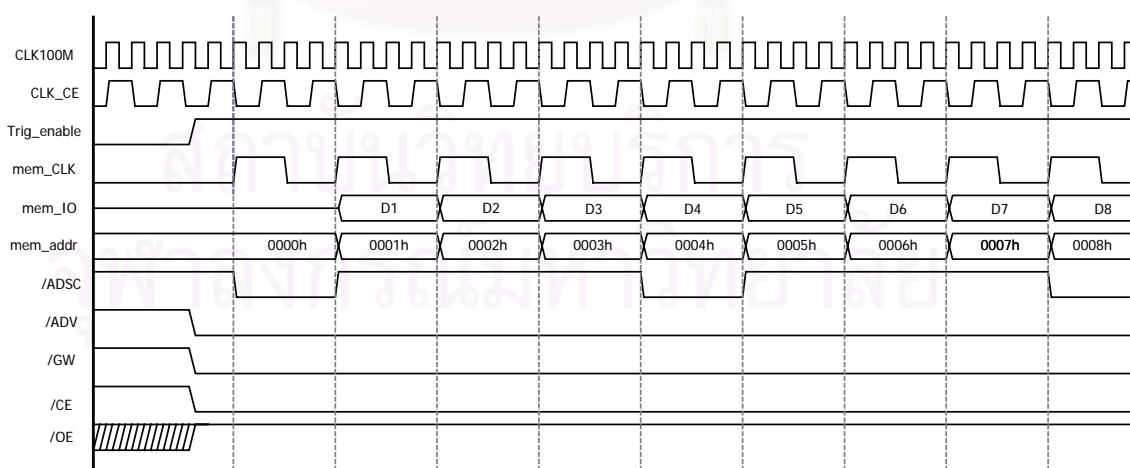
สัญญาณ Read\_allow จะทำงานหลังจากสัญญาณ Write\_allow เริ่มการทำงานไปแล้วระยะเวลาหนึ่ง โดยสามารถโปรแกรมได้โดยวงจร Delay Counter ซึ่งต่ออยู่กับ Data Bus ดังรูปที่ ๗.9

ข้อมูลเอาต์พุตจาก Programmable Delay Line จะมีขนาด 12 บิต แต่การจัดเก็บลงในหน่วยความจำจะเก็บแอดเดรสละ 24 บิต หรือข้อมูล 2 point ต่อแอดเดรส ดังนั้นก่อนจะเขียนลงหน่วยความจำต้องเก็บลง Register ให้ครบครั้งละ 24 บิต เสียก่อน

#### 4. Memory Address Control

Memory Address Control ทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมการเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำหลังจากเกิดการ Trig และสร้างสัญญาณควบคุมการอ่านหน่วยความจำเมื่อได้รับคำสั่งจากคอนโทรลเลอร์ที่อยู่ภายในชิป EZusb โดยเซตบิต Ch1\_FRDen หรือ Ch2\_FRDen ใน Fast Transfer Register [06h] ขึ้นอยู่กับว่าต้องการอ่านข้อมูลของช่องสัญญาณไหน

สัญญาณควบคุมการเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำแสดงเป็น Timing Diagram ดังรูปที่ ๗.10 โดยเริ่มมีการเขียนข้อมูลเมื่อมีการ Trig หรือสัญญาณ Trig\_enable เป็น '1' ซึ่งสัญญาณนี้จะเป็น '1' เมื่อสัญญาณจาก ADC มีขนาดสูงหรือต่ำกว่าค่าใน Trig level Register ที่กำหนดไว้ การทำงานในหน่วยความจำจะเป็นแบบ Burst Mode โดยจะไหลค่า Address จากสัญญาณ mem\_addr เมื่อ /ADSC เป็น '0' และจะมีการเพิ่มค่าบิตแอดเดรส 2 บิต สุดท้ายเองภายในเมื่อสัญญาณ /ADV เป็น '0' ดังนั้นสัญญาณ /ADSC จะเป็น '0' ทุกครั้งที่บิตที่ 1 และบิตที่ 0 เป็น "00" ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ส่วนการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำเพื่อส่งข้อมูลผ่าน USB พิจารณาได้ตามวงจร Memory to Data Bus Buffer

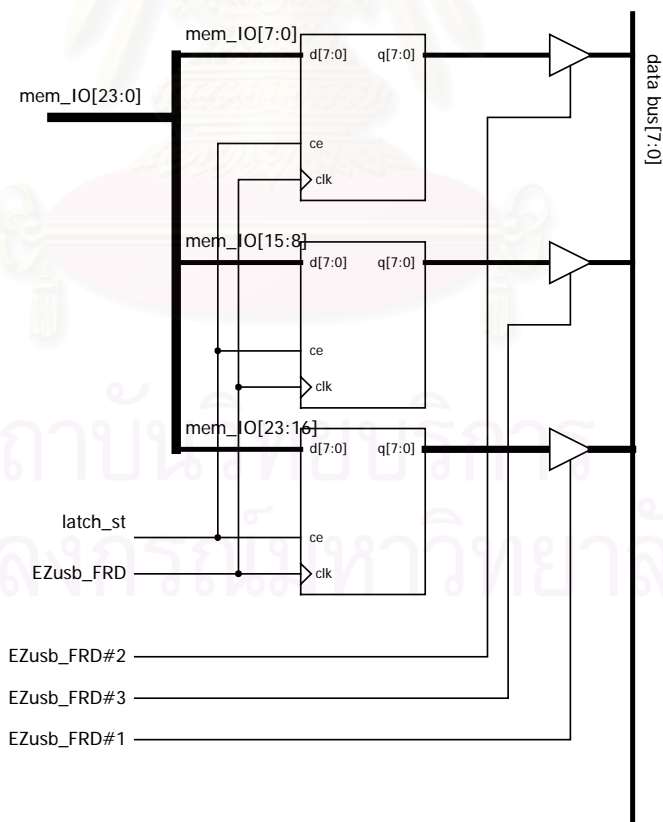


รูปที่ ๗.10 Timing Diagram ช่วงการเขียนข้อมูลลง Memory

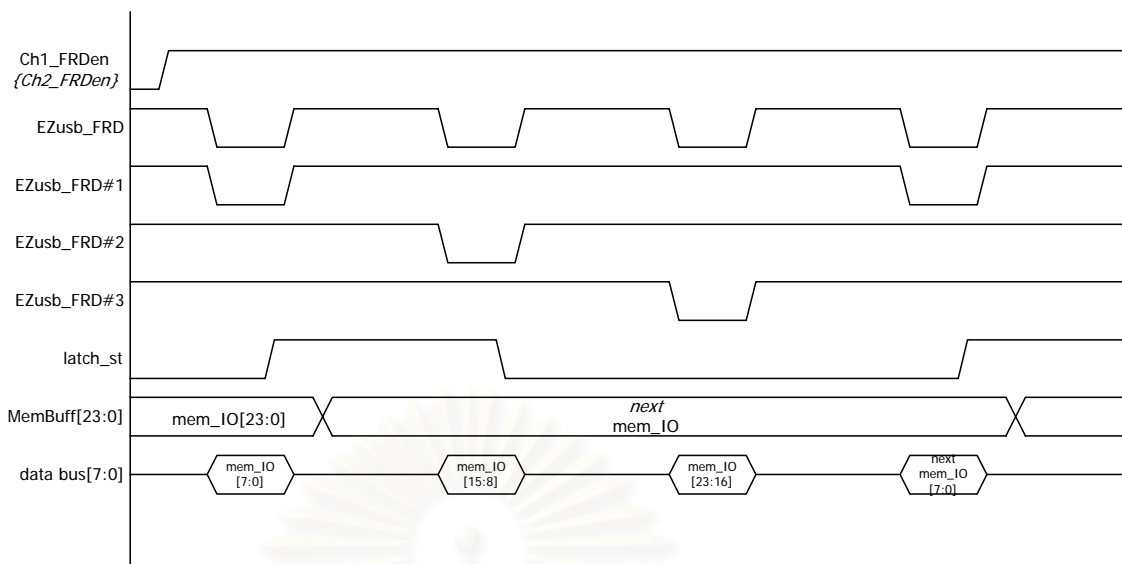
## 5. Memory to Data Bus Buffer

Memory to Data Bus Buffer ทำหน้าที่รับข้อมูล 24 บิต จาก I/O ของหน่วยความจำเมื่อมีการอ่านข้อมูล เพื่อให้ชิป EZusb สามารถอ่านข้อมูลครั้งละ 8 บิต ผ่าน Data Bus ได้ โดยการอ่านข้อมูล 1 แอดเดรสซึ่งมี 24 บิต ต่อ 1 ช่องสัญญาณ จะต้องอ่าน 3 ครั้ง (ครั้งละ 8 บิต) โดยครั้งแรกจะเป็นการส่งข้อมูลลง Data Bus และรับข้อมูลทั้ง 24 บิต มาเก็บไว้ใน register ขนาด 24 บิต เพื่อให้เตรียม Data สำหรับการอ่านรอบต่อไป

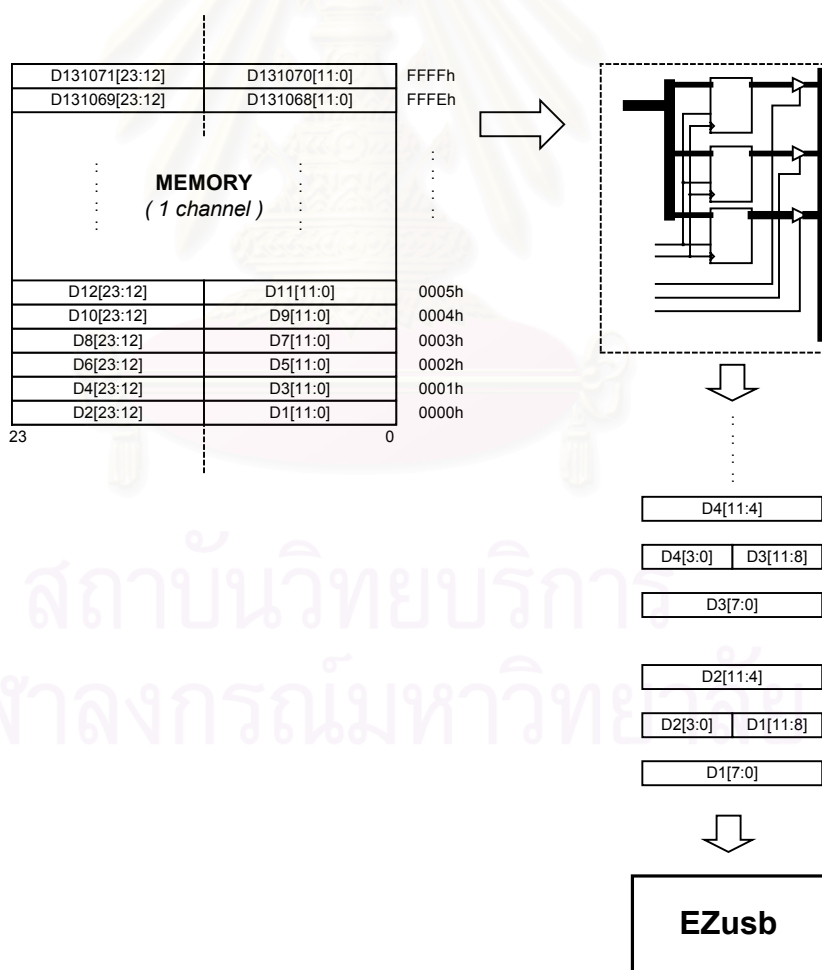
พิจารณาตามรูปที่ ข.11 ซึ่งเป็นวงจร Register สำหรับรับข้อมูล 24 บิต จาก Memory I/O มาเก็บไว้ก่อน โดยมีสัญญาณ latch\_st เป็น CE (Clock Enable) และ Ezusb\_FRD เป็นสัญญาณ Clock ให้กับ Register ส่วนสัญญาณ Ezusb\_FRD#1, Ezusb\_FRD#2, Ezusb\_FRD#3 จะเป็นสัญญาณ Enable ให้กับ Tristate Buffer ซึ่งจะ Active ที่เวลาต่างๆกันตามลำดับการอ่าน เพื่อส่งข้อมูลไปที่ Data Bus ครั้งละ 8 บิต จะครบทั้งครบทั้ง 24 บิต มี Timing Diagram แสดงดังรูปที่ ข.12 รูปแบบการลำดับข้อมูลที่อ่านออกมาครั้งละ 8 บิต จะเริ่มด้วยข้อมูลชุดที่ 1 คือบิตที่ 0 – 7 เมื่อมีการอ่านครั้งต่อไปอีก 8 บิต จะประกอบด้วยข้อมูลชุดที่ 1 คือบิตที่ 8 – 11 และข้อมูลชุดที่ 2 คือบิตที่ 0 – 3 และเมื่อมีการอ่านอีกครั้งเป็นครั้งที่สามจะเป็นข้อมูลของชุดที่ 2 คือบิตที่เหลือคือ 4 – 11 พิจารณาตามรูปที่ ข.13



รูปที่ ข.11 วงจร Memory to Data Bus Buffer



รูปที่ ข.12 Timing Diagram การอ่านข้อมูลจาก Memory

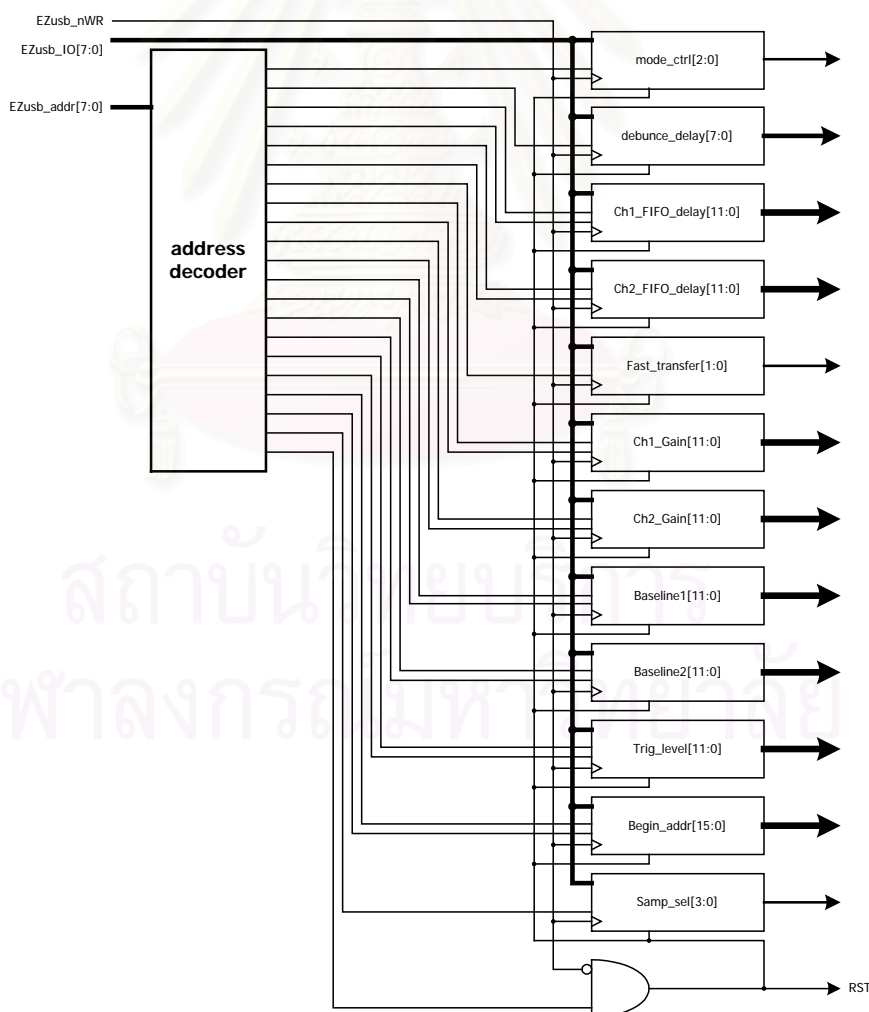


รูปที่ ข.13 แสดงรูปแบบการเขียนและอ่านข้อมูลจาก Memory

## 6. USB & Microcontroller Interface

USB & Microcontroller Interface ทำหน้าที่ติดต่อกับชิป EZusb ซึ่งเป็นชิป USB ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ภายใน ใช้ชุดคำสั่งเดียวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS51 ในวงจรส่วนติดต่อกับชิป USB นี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนส่งข้อมูลจาก Memory ไปที่ชิป USB (ในที่นี้หมายถึง EZusb) เมื่อมีการ Fast read จากชิป USB เพื่อเอาข้อมูลภายในหน่วยความจำส่งไปให้คอมพิวเตอร์ซึ่งก็คือวงจรในส่วนของ Memory to Data Bus Buffer นั่นเอง และส่วนรับข้อมูลเมื่อมีการเขียนข้อมูลจากชิป USB มาที่ Control Register ซึ่งพิจารณาได้ตามรูปที่ ข.14

จากรูปที่ ข.14 ประกอบด้วยวงจร Address Decoder ทำหน้าที่รับข้อมูลจากพอร์ต Ezusb\_addr เพื่อสร้าง สัญญาณ Enable ให้กับ Register ที่ตำแหน่งแอดเดรสต่างๆเพื่ออนุญาตให้รับข้อมูลจาก Ezusb\_IO ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า Register บางตัวจะมีสัญญาณ Enable สองสัญญาณ เนื่องจากเป็น Register ที่มีขนาดมากกว่า 8 บิต จึงต้องมีการเขียนข้อมูล 2 ครั้ง เช่น Ch1\_Gain , Baseline1 , Baseline2 , Begin\_Addr เป็นต้น



รูปที่ ข.14 แสดงวงจร Control Register และ Address



การควบคุมวงจรของดิจิทัลเซออร์จากซอฟต์แวร์ประยุกต์ทำได้โดยการโปรแกรมค่าต่างใน Memory Map ของ Control Register แสดงดังรูปที่ ข.15 โดยมีรายละเอียดสรุปได้ดังนี้

1) Mode control register [00h] ทำหน้าที่กำหนดการทำงานของแต่ละช่องสัญญาณมีขนาด 5 บิต

Mode\_ctrl [1:0] : ChX\_trig กำหนดการทำงานของแต่ละช่องสัญญาณ โดยที่ X = 1, 2

“00” : ช่องสัญญาณที่ 1 disable

“01” : Trig ด้วยระดับสัญญาณของช่องสัญญาณที่ 1

“10” : Trig ด้วยระดับสัญญาณของช่องสัญญาณที่ 2

“11” : Trig ด้วยสัญญาณ Trig จากภายนอก

Mode\_ctrl [4] : positive/negative trig ใช้กำหนดรูปแบบการ Trig ว่าจะให้ Trig สัญญาณฝั่งบวก หรือฝั่งลบของสัญญาณ

‘0’ : Positive trig

‘1’ : Negative trig

2) Debounce delay [01h] ขนาด 8 บิต ทำหน้าที่กำหนดค่าหน่วยเวลาสำหรับวงจรถัดสัญญาณ Debounce ของสัญญาณ Trig จากภายนอก โดยค่าหน่วยเวลาเท่ากับ Debounce delay x 2 us

3) Channel 1 FIFO delay [02h] , [03h] ขนาด 10 บิต โดยบิตที่ 0 – 7 อยู่ที่ตำแหน่ง 02h, บิตที่ 8 - 9 อยู่ที่ตำแหน่ง 03h ทำหน้าที่กำหนดค่าหน่วยเวลาระหว่างการเขียนและอ่านข้อมูลภายใน FIFO ของช่องสัญญาณ 1 สามารถกำหนดเวลาได้ตั้งแต่ 0 – 1024

4) Channel 2 FIFO delay [04h] , [05h] ขนาด 10 บิต โดยบิตที่ 0 – 7 อยู่ที่ตำแหน่ง 04h, บิตที่ 8-9 อยู่ที่ตำแหน่ง 05h ทำหน้าที่กำหนดค่าหน่วยเวลาระหว่างการเขียนและอ่านข้อมูลภายใน FIFO ของช่องสัญญาณ 2 สามารถกำหนดเวลาได้ตั้งแต่ 0 – 1024

5) Fast transfer configuration [06h] ขนาด 2 บิต ทำหน้าที่ควบคุมการอ่านเขียนข้อมูลของหน่วยความจำ

- Fast\_Transfer[0] : Mem\_FRD ควบคุมการอ่านข้อมูลจาก memory ไปสู่ชิป EZusb

‘0’ : ช่องสัญญาณที่ 1 fast read disable

‘1’ : ช่องสัญญาณที่ 1 fast read enable

- Fast\_Transfer[1] : Mem\_FRD ควบคุมการอ่านข้อมูลจาก memory ไปสู่ชิป EZusb

‘0’ : ช่องสัญญาณที่ 2 fast read disable

‘1’ : ช่องสัญญาณที่ 2 fast read enable

สามารถทำการอ่านข้อมูลได้ครั้งละ 1 ช่องสัญญาณเท่านั้น ไม่สามารถอ่าน 2 ช่องสัญญาณ พร้อมกันได้

6) Channel 1 Gain Control [07h] , [08h] มีขนาด 12 บิต โดยบิตที่ 0 ถึง 7 อยู่ที่ตำแหน่ง 07h, บิตที่ 11 ถึง 8 อยู่ตำแหน่งที่ 08h ทำหน้าที่กำหนดขนาดของสัญญาณ Gain Control ของช่องสัญญาณที่ 1

7) Channel 2 Gain Control [09h] , [0Ah] มีขนาด 12 บิต โดยบิต ที่ 0 ถึง 7 อยู่ที่ตำแหน่ง 09h, บิตที่ 11 ถึง 8 อยู่ตำแหน่งที่ 0Ah ทำหน้าที่กำหนดขนาดของสัญญาณ Gain Control ของช่องสัญญาณที่ 2

8) Channel 1 Base Line Setting [0Bh] , [0Ch] มีขนาด 12 บิต โดยบิต ที่ 0 ถึง 7 อยู่ที่ตำแหน่ง 0Bh, บิตที่ 11 ถึง 8 อยู่ตำแหน่งที่ 0Ch ทำหน้าที่กำหนดขนาดของสัญญาณ Base Line Setting ของช่องสัญญาณที่ 1

9) Channel 2 Base Line Setting [0Dh] , [0Eh] มีขนาด 12 บิต โดยบิตที่ 0 ถึง 7 อยู่ที่ตำแหน่ง 0Bh, บิตที่ 11 ถึง 8 อยู่ตำแหน่งที่ 0Ch ทำหน้าที่กำหนดขนาดของสัญญาณ Base Line Setting ของช่องสัญญาณที่ 2

10) Trig Level [0Fh] , [10h] มีขนาด 12 บิต โดยบิตที่ 0 ถึง 7 อยู่ที่ตำแหน่ง 0Fh, บิตที่ 11 ถึง 8 อยู่ตำแหน่งที่ 10h ทำหน้าที่กำหนดขนาดของระดับสัญญาณที่จะทำการ Trig สัญญาณจากช่องสัญญาณที่ 1 หรือช่องสัญญาณ 2

11) Begin Address [11h] , [12h] ขนาด 16 บิต โดยบิตที่ 0- 7 อยู่ที่ตำแหน่ง 11 และ บิตที่ 8 – 15 อยู่ที่ตำแหน่ง 12h ทำหน้าที่เก็บค่าตำแหน่งเริ่มต้นของข้อมูลในหน่วยความจำที่ทางชิป EZusb ต้องการเริ่มอ่าน

12) RESET [13h] ขนาด 0 บิต เมื่อทำการเขียนค่าใดๆที่ตำแหน่งนี้(02h) จะเป็นการรีเซ็ตค่าใน register ทุกอันและรีเซ็ต วงจรภายใน FPGA ทั้งหมด

13) Sampling Rate Select [14h] ขนาด 4 บิต ทำหน้าที่กำหนดอัตราซักรหัสตัวอย่างของข้อมูลจาก ADC ทั้ง 2 ช่องสัญญาณ

"0000" : 100 Mhz

"0001" : 50 Mhz

"0010" : 25 Mhz

"0011" : 12.5 Mhz

"0100" : 6.25 Mhz

"0101" : 3.125 Mhz

"0110" : 1.5625 Mhz

- "0111" : 781.25 Khz
- "1000" : 390.625 Khz
- "1001" : 195.3125 Khz
- "1010" : 97.65625 Khz
- "1011" : 48.828125 Khz
- "1100" : 24.4140625 Khz
- "1101" : 12.20703125 Khz
- "1110" : 6.103515625 Khz ตามลำดับ

Impulse memory map											
Wr	014 h					0	0	0	0	Samp_sel [3 : 0]	
Wr	013 h									RESET	
Wr	012 h	0	0	0	0	0	0	0	0	Begin_Addr_high[ 7 : 0 ]	
Wr	011 h	0	0	0	0	0	0	0	0	Begin_Addr_low[7:0]	
Wr	010 h					0	0	0	0	TrigLevel_high[ 3 : 0 ]	
Wr	00F h	0	0	0	0	0	0	0	0	TrigLevel_low [ 7 : 0 ]	
Wr	00E h					0	0	0	0	BASEline2_high [ 3 : 0 ]	
Wr	00D h	0	0	0	0	0	0	0	0	BASEline2_low [ 7 : 0 ]	
Wr	00C h					0	0	0	0	BASEline1_high [ 3 : 0 ]	
Wr	00B h	0	0	0	0	0	0	0	0	BASEline1_low [ 7 : 0 ]	
Wr	00A h					0	0	0	0	Ch2_GAIN_high [ 3 : 0 ]	
Wr	009 h	0	0	0	0	0	0	0	0	Ch2_GAIN_low [ 7 : 0 ]	
Wr	008 h					0	0	0	0	Ch1_GAIN_high [ 3 : 0 ]	
Wr	007 h	0	0	0	0	0	0	0	0	Ch1_GAIN_low [ 7 : 0 ]	
Wr	006 h							FRD Ch2	FRD Ch1	Fast_transfer	
Wr	005 h							0	0	Ch2FIFO_delay_high[9:8]	
Wr	004 h	0	0	0	0	0	0	0	0	Ch2FIFO_delay_low[ 7:0 ]	
Wr	003 h							0	0	Ch1FIFO_delay_high[ 9:8 ]	
Wr	002 h	0	0	0	0	0	0	0	0	Ch1FIFO_delay_low[ 7:0 ]	
Wr	001 h	0	0	0	0	0	0	0	0	Debounce_delay	
Wr	000 h					positive/negative	trig config		Mode_Cntrl [ 5 : 0 ]		
		7	6	5	4	3	2	1	0		
		MSB									LSB

รูปที่ 15 Memory Map ของ Control Register วงจรส่วน digital

## ภาคผนวก ค

คุณลักษณะของตัวเก็บประจุโพลีโพรไพลีน ที่ใช้ประกอบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์  
VISHAY MKP 1845

**MKP 1845**

Vishay Roederstein



**Metallized Polypropylene Film Capacitor**  
Related Document: CECC 31 200

**MAIN APPLICATIONS:**

High voltage, high current and high pulse operations, deflection circuits in TV sets (S-correction and fly-back tuning). Protection circuits in SMPS's. Snubber and electronic ballast circuits. Input and output filtering in SPS designs, storage, timing and integrating circuits.

**MARKING:**

Manufacturer's logo/type/C-value/rated voltage/tolerance/ date of manufacture

**DIELECTRIC:**

Polypropylene film

**ELECTRODES:**

Vacuum deposited aluminum

**COATING:**

Metal-foil-wrapped, insulated, epoxy resin sealed, flame retardant

**CONSTRUCTION:**

Extended double-sided metallized polyester film, internal series connection (630 to 2000 VDC), double-sided metallized polyester carrier film, (refer to general information)

**LEADS:**

Tinned wire

**IEC TEST CLASSIFICATION:**

55/100/56, according to IEC 60068

**OPERATING TEMPERATURE RANGE:**

- 55°C to + 100°C

**CAPACITANCE RANGE:**

1000pF to 4.7μF

**CAPACITANCE TOLERANCES:**

± 20% (M), ± 10% (K), ± 5% (J)

**RATED VOLTAGES (U<sub>R</sub>):**

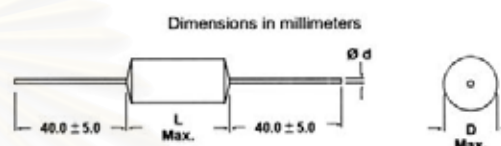
160 VDC, 250 VDC, 400 VDC, 630 VDC, 1000 VDC, 1600 VDC, 2000 VDC

**PERMISSIBLE AC VOLTAGES (RMS) UP TO 60Hz:**

100 VAC, 160 VAC, 220 VAC, 400 VAC, 600 VAC, 650 VAC, 700 VAC

**TEST VOLTAGE (ELECTRODE/ELECTRODE):**

1.6 x U<sub>R</sub> for 2 s



D	Ø d
≤ 7.0	0.7
< 16.0	0.8
≥ 16.0	1.0

**INSULATION RESISTANCE:**

Measured at 100 VDC after one minute

**For C ≤ 0.33μF:**

100,000 MΩ minimum value (150,000 MΩ typical value)

**TIME CONSTANT:**

Measured at 100 VDC after one minute

**For C > 0.33μF:**

30,000 s minimum value (50,000 s typical value)

**TEMPERATURE COEFFICIENT:**

-250 x 10<sup>-6</sup>/°C (typical value)

**CAPACITANCE DRIFT:**

Up to + 40°C, ± 0.5% for a period of two years

**DERATING FOR DC AND AC.****CATEGORY VOLTAGE U<sub>C</sub>:**

At + 85°C: U<sub>C</sub> = 1.0 U<sub>R</sub>

At + 100°C: U<sub>C</sub> = 0.7 U<sub>R</sub>

**SELF INDUCTANCE:**

~ 12 nH measured with 6mm long leads

**PULL TEST ON LEADS:**

≥ 20 N in direction of leads according to IEC 60068-2-21

**BEND TEST ON LEADS:**

2 bends through 90°C with half of the force used in pull test

**RELIABILITY:**

Operational life > 300,000 h

Failure rate < 10 FIT (40°C and 0.5 x U<sub>R</sub>)

For further details, please refer to the general information provided in this catalog.

**MAXIMUM PULSE RISE TIME**

CAPACITOR LENGTH (mm)	Maximum pulse rise time d <sub>v</sub> /d <sub>t</sub> [V/μs]						
	160 VDC	250 VDC	400 VDC	630 VDC	1000 VDC	1600 VDC	2000 VDC
17	900	1140	1840	—	—	—	—
22	450	560	910	3430	—	—	—
29	260	320	520	2120	2800	3800	6200
34	202	240	400	1524	2000	2680	4200
44	140	170	280	980	1280	1690	2600

If the maximum pulse voltage is less than the rated voltage higher d<sub>v</sub>/d<sub>t</sub> values can be permitted.



## MKP 1845

Metallized Polypropylene, Related Document: CECC 31 200 Vishay Roederstein

### DISSIPATION FACTOR TAN δ

MEASURED AT	$C \leq 0.1\mu\text{F}$	$0.1\mu\text{F} < C \leq 1.0\mu\text{F}$	$C > 1.0\mu\text{F}$
1kHz	$0.3 \times 10^{-3}$	$0.3 \times 10^{-3}$	$0.3 \times 10^{-3}$
10kHz	$0.4 \times 10^{-3}$	$0.4 \times 10^{-3}$	—
100kHz	$1.5 \times 10^{-3}$	—	—
Maximum values			

CAPACITANCE	CAPACITANCE CODE	VOLTAGE CODE 16 160 VDC/ 100 VAC		VOLTAGE CODE 25 250 VDC/ 160 VAC		VOLTAGE CODE 40 400 VDC/ 220 VAC		VOLTAGE CODE 63 630 VDC/ 400 VAC	
		D	L	D	L	D	L	D	L
1000pF	- 210	—	—	—	—	—	—	—	—
1500pF	- 215	—	—	—	—	—	—	—	—
2200pF	- 222	—	—	—	—	—	—	—	—
3300pF	- 233	—	—	—	—	—	—	—	—
4700pF	- 247	—	—	—	—	—	—	—	—
6800pF	- 268	—	—	—	—	—	—	—	—
0.01μF	- 310	—	—	—	—	6.0	17.0	7.0	22.0
0.015μF	- 315	—	—	—	—	6.5	17.0	8.0	22.0
0.022μF	- 322	—	—	6.0	17.0	7.5	17.0	9.5	22.0
0.033μF	- 333	6.0	17.0	7.0	17.0	7.0	22.0	9.0	29.0
0.047μF	- 347	6.5	17.0	8.0	17.0	8.0	22.0	10.5	29.0
0.068μF	- 368	7.5	17.0	7.0	22.0	9.0	22.0	12.5	29.0
0.1μF	- 410	7.0	22.0	8.0	22.0	11.0	22.0	12.5	34.0
0.15μF	- 415	8.0	22.0	9.5	22.0	10.0	29.0	15.0	34.0
0.22μF	- 422	9.5	22.0	9.0	29.0	12.0	29.0	14.5	44.0
0.33μF	- 433	9.0	29.0	10.5	29.0	13.5	29.0	17.5	44.0
0.47μF	- 447	10.0	29.0	12.0	29.0	15.0	34.0	21.0	44.0
0.68μF	- 468	12.0	29.0	13.0	34.0	17.5	34.0	25.0	44.0
1.0μF	- 510	12.5	34.0	15.5	34.0	17.5	44.0	—	—
1.5μF	- 515	15.5	34.0	15.5	44.0	21.5	44.0	—	—
2.2μF	- 522	15.5	44.0	18.5	44.0	26.0	44.0	—	—
3.3μF	- 533	18.5	44.0	22.5	44.0	—	—	—	—
4.7μF	- 547	22.0	44.0	—	—	—	—	—	—

Further C-values on request  
 $pcm = L + 3.5$

### RECOMMENDED PACKAGING

LETTER CODE	TYPE OF PACKAGING	REEL DIAMETER (mm)	ORDERING CODE EXAMPLE	
G	AMMO	—	MKP 1845-310-135-G	X
R	REEL	350	MKP 1845-310-135-R	X
—	BULK for L > 31.5mm	—	MKP 1845-410-135	X

**MKP 1845**

Vishay Roederstein Metallized Polypropylene, Related Document: CECC 31 200

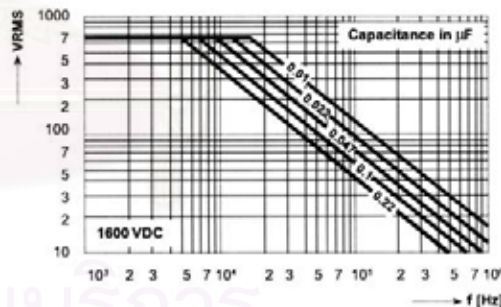
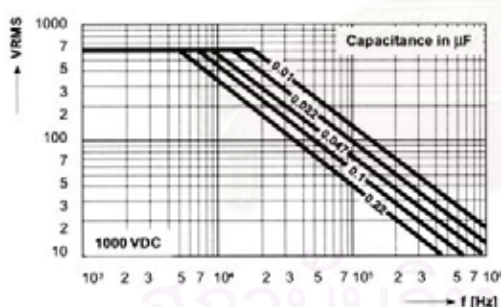
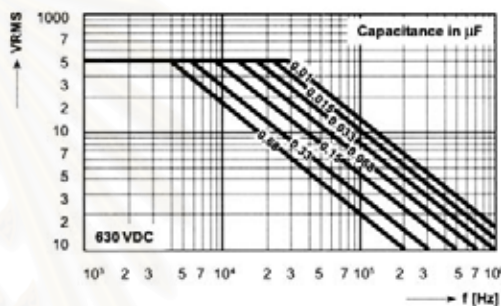
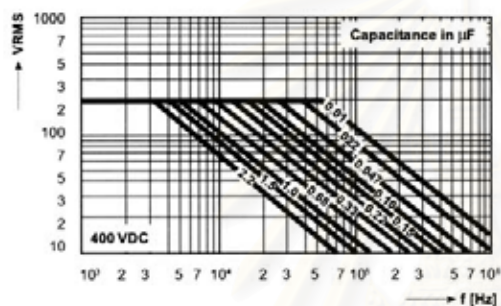
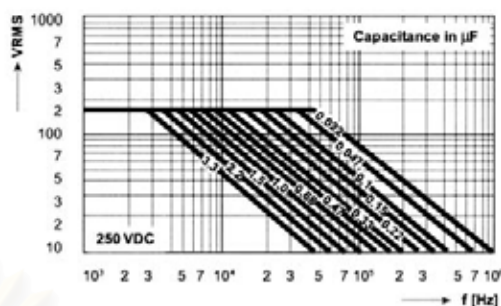
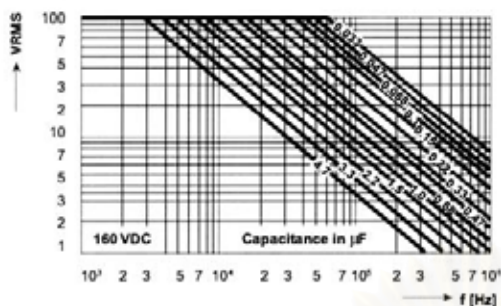


CAPACITANCE	CAPACITANCE CODE	VOLTAGE CODE 10 1000 VDC/ 600 VAC		VOLTAGE CODE 13 1600VDC/ 650 VAC		VOLTAGE CODE 20 2000 VDC/ 700 VAC	
		D	L	D	L	D	L
1000pF	- 210	—	—	—	—	6.5	29.0
1500pF	- 215	—	—	—	—	6.5	29.0
2200pF	- 222	—	—	—	—	6.5	29.0
3300pF	- 233	—	—	—	—	7.0	29.0
4700pF	- 247	—	—	—	—	8.0	29.0
6800pF	- 268	—	—	—	—	9.5	29.0
0.01μF	- 310	6.5	29.0	8.0	29.0	11.0	29.0
0.015μF	- 315	8.0	29.0	9.5	29.0	11.5	34.0
0.022μF	- 322	9.0	29.0	11.0	29.0	13.0	34.0
0.033μF	- 333	11.0	29.0	11.5	34.0	16.0	34.0
0.047μF	- 347	11.0	34.0	13.5	34.0	15.0	44.0
0.068μF	- 368	13.0	34.0	16.0	34.0	18.0	44.0
0.1μF	- 410	15.5	34.0	15.0	44.0	21.0	44.0
0.15μF	- 415	15.0	44.0	18.5	44.0	—	—
0.22μF	- 422	18.0	44.0	22.0	44.0	—	—
0.33μF	- 433	—	—	—	—	—	—
0.47μF	- 447	—	—	—	—	—	—
0.68μF	- 468	—	—	—	—	—	—
1.0μF	- 510	—	—	—	—	—	—
1.5μF	- 515	—	—	—	—	—	—
2.2μF	- 522	—	—	—	—	—	—
3.3μF	- 533	—	—	—	—	—	—
4.7μF	- 547	—	—	—	—	—	—

Further C-values on request  
 $pcm = L + 3.5$

**RECOMMENDED PACKAGING**

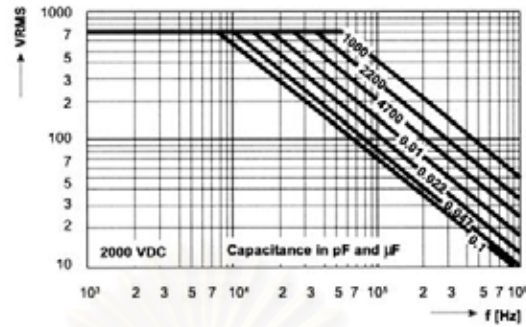
LETTER CODE	TYPE OF PACKAGING	REEL DIAMETER (mm)	ORDERING CODE EXAMPLE	
G	AMMO	—	MKP 1845-310-135-G	X
R	REEL	350	MKP 1845-310-135-R	X
—	BULK for L > 31.5mm	—	MKP 1845-410-135	X



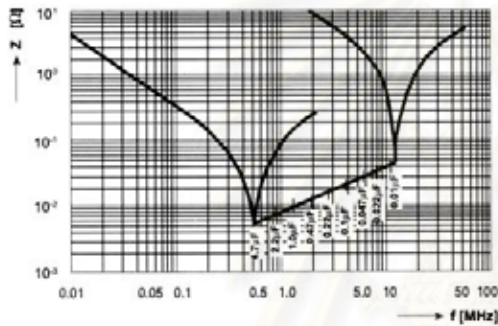
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**MKP 1845**

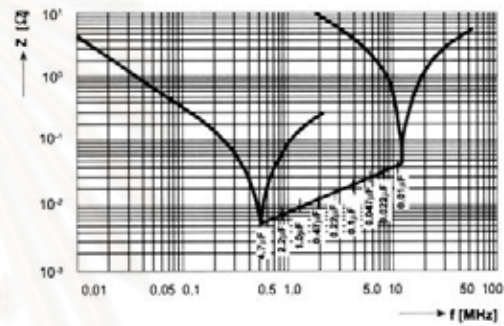
Vishay Roederstein Metallized Polypropylene, Related Document: CECC 31 200



Permissible AC Voltage versus Frequency



Impedance versus Frequency  $Z = f(f)$   
(Lead length 6.0mm) 160 VDC to 630 VDC



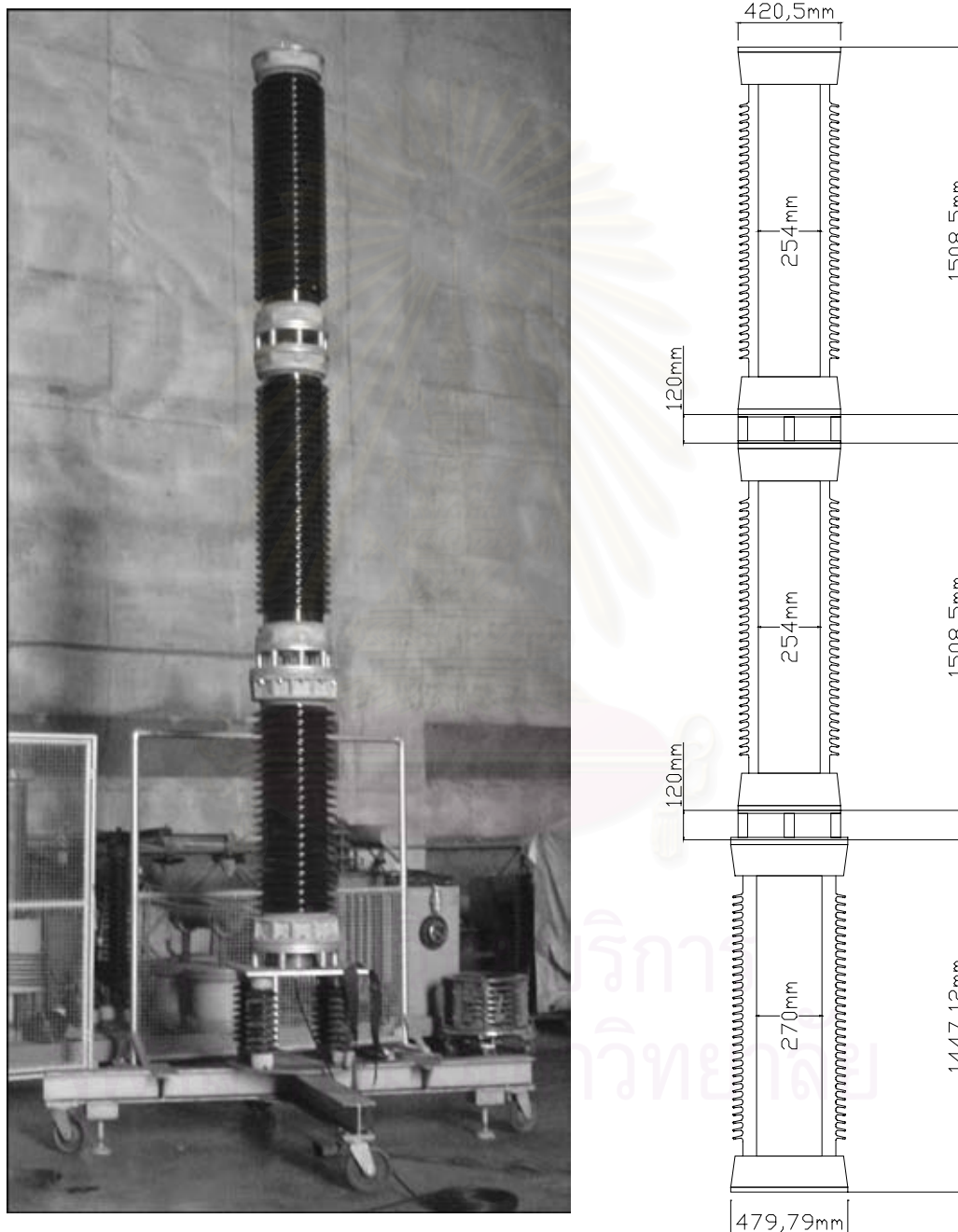
Impedance versus Frequency  $Z = f(f)$   
(Lead length 6.0mm) 1000 VDC to 2000 VDC

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ง

ภาคตัดขวางของฉนวนพอร์ซเลนที่นำมาประกอบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์



รูปที่ ง.1 ภาพสเกตช์แสดงภาคตัดขวางของฉนวนพอร์ซเลนที่นำมาประกอบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัยธร ลิมาภรณ์วณิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2520 ณ อำเภอบางรัก จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541(ภาคการศึกษาปลาย)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย